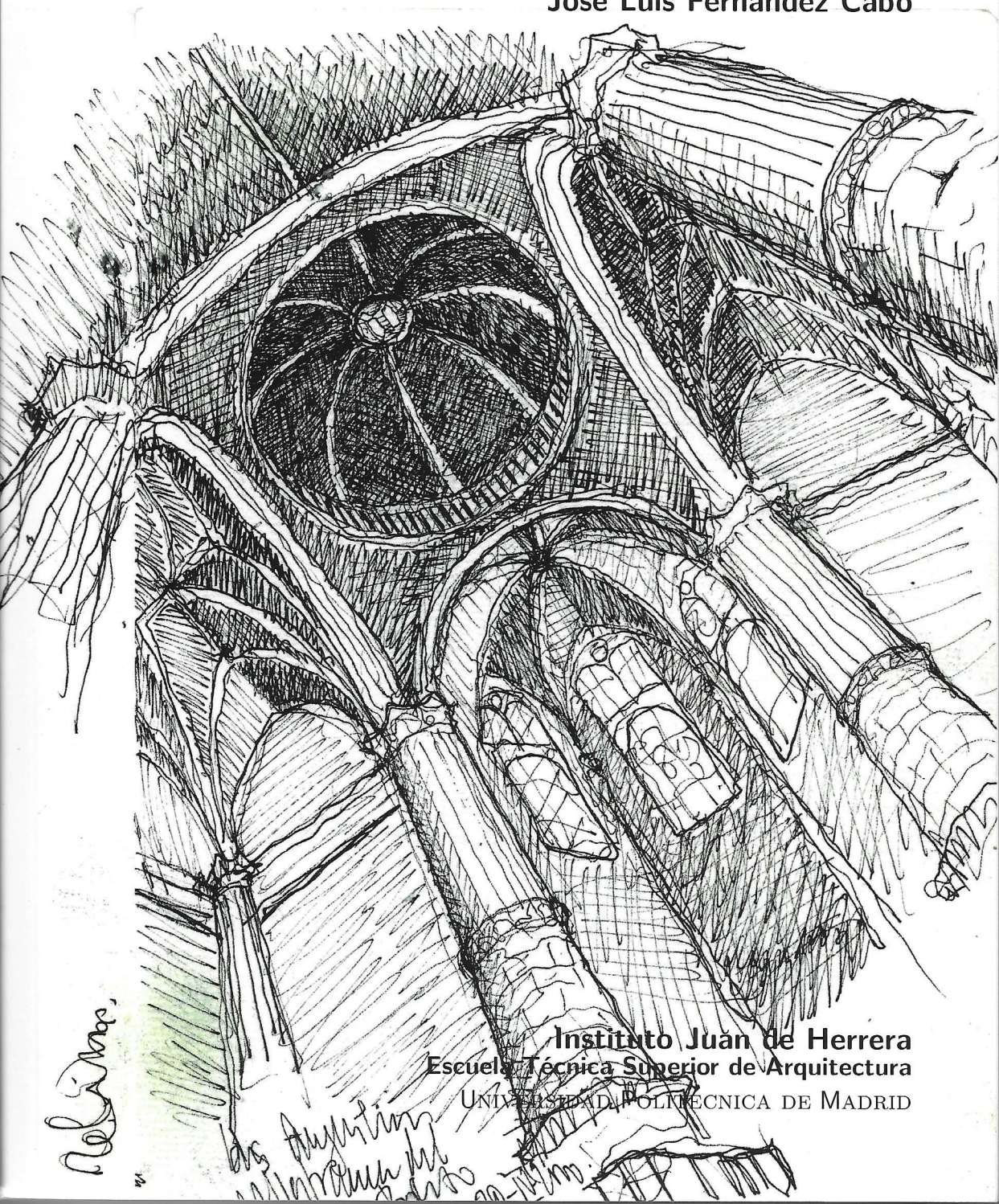
El papel de la estructura en el proyecto de Arquitectura

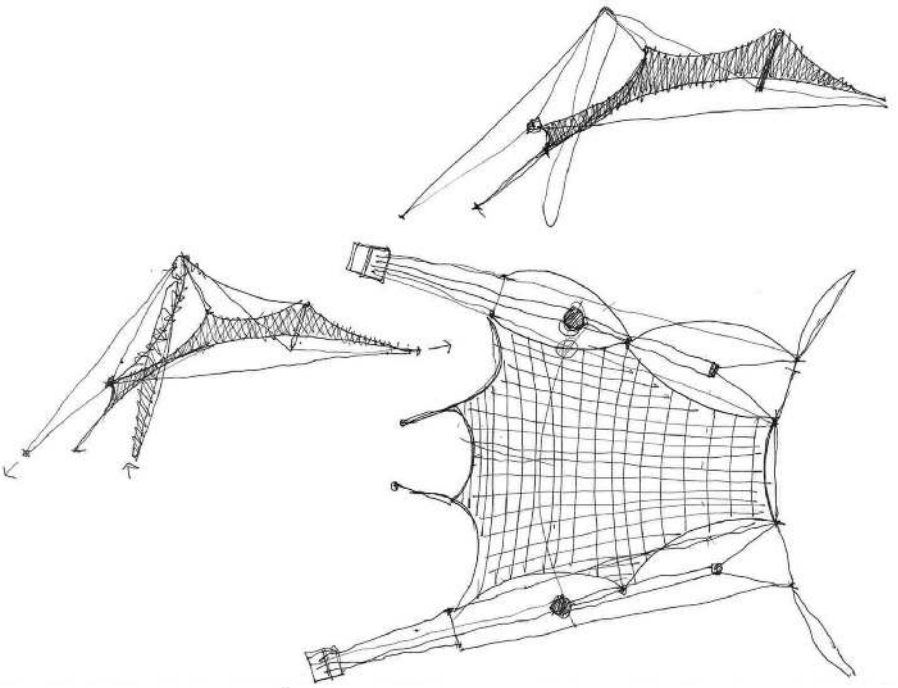
José Luis Fernández Cabo

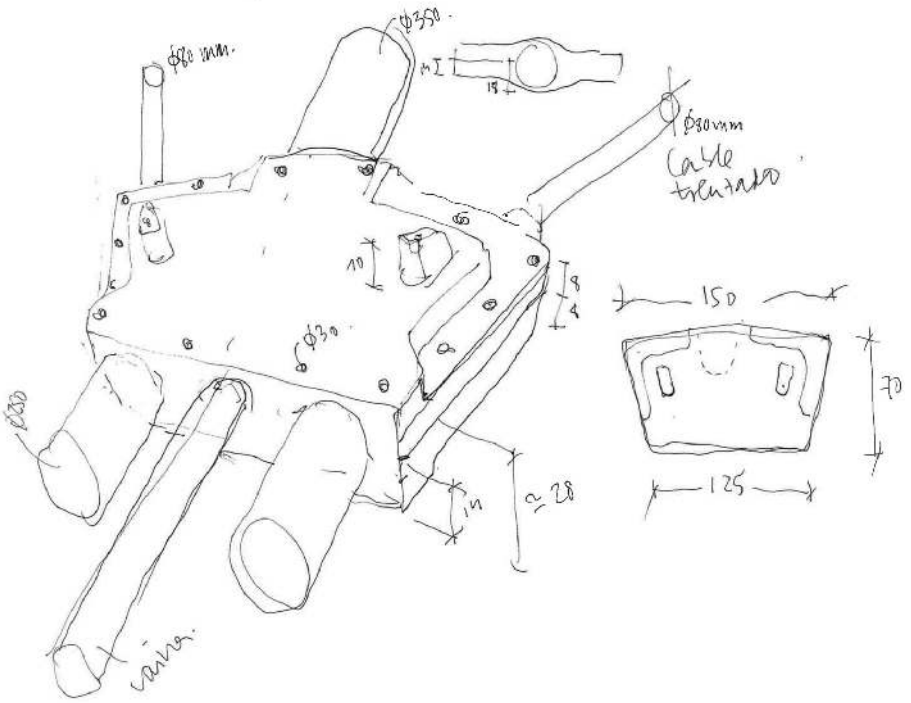


Instituto Juan de Herrera
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Universidad Politécnica de Madrid

El papel de la estructura en el proyecto de Arquitectura

Un enfoque global





Ø80 mm.
Ø350.
18
Ø80mm
Cable trenzado
10
8
4
Ø30
Ø80
14
≃ 28
150
70
125
vaina.

El papel de la estructura en el proyecto de Arquitectura

Un enfoque global

José Luis Fernández Cabo

edición a cargo de:
Joaquín Antuña Bernardo

Instituto Juan de Herrera
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Universidad Politécnica de Madrid

© José Luis Fernández Cabo, 2017
© de la edición, Instituto Juan de Herrera, 2017
ISBN: 978–84–9728–560–5
Depósito legal: M–12077–2017
Cubierta: Colegiata de Villafranca del Bierzo, dibujo del autor.
Página iv: Cubierta del estadio olímpico de Munich, dibujos del autor.
Impresión: StockCeroDayton (www.stockcerodayton.es)

Índice general

Presentación 3
Prólogo 5
Introducción 9
Escuelas Sagrada Familia 25
Bodegas Ysios 27
Centro de Estudiantes en Estocolmo 29
MUSAC 33
La Sagrada Familia 35
El Parque Güell 41
Maison de l'Homme 45
La Villa Saboya 47
Capilla de Ronchamp 49
Capilla de la Resurrección 53
Aeropuerto de Stuttgart 55
Pabellón multiusos de Manheim 57
Torre de comunicaciones Olympiaturm 59
Torre de comunicaciones Collserola 61
Estadio olímpico de Munich 63
Estadio Allianz Arena, Munich 73
Puente sobre el Sil 77
Media-TIC 79
Pasarela Punt da Suransuns 81
La pirámide del Louvre 83
La iglesia de la Fuencisla 85
Las atarazanas de Barcelona 87
Ayuntamiento de Säynätsalo 89
Vivienda en Muuratsalo 91
La Universidad de Jyväskyla 93
Villa Mairea 97
Capilla de Saint Benedict 101
Palacio de Katsura 105
Casa de Cultura de Estocolmo 111
Centro de Prensa y Difusión Shizuoka 113
Gimnasio Nacional Yoyogi 115
Palacio de Congresos de Salamanca 119
Biblioteca municipal de Usera 123
Mercado de Santa Catalina 127
Palazzo dell'Esposizione Internazionale del Lavoro 133
La ópera de Sydney 139
Terminal T4 aeropuerto de Barajas 149
Museo Guggenheim de New York 155

Center for British Art . . . 161
Capilla de Otaniemi . . . 165
Vivienda colectiva en Rafael Calvo . . . 167
Vivienda colectiva en Arturo Soria . . . 171
Vivienda colectiva en Fuencarral . . . 173
Edificio de Industriales, Carlos III en Leganés . . . 179
El puente peatonal Allmandring . . . 183
Edificio Boots . . . 185
Filarmónica de Berlín . . . 187
Nueva Galería Nacional de Berlín . . . 191
Cubierta de la estación de Leuven . . . 201
Palm House, Kew Gardens . . . 203
Crystal Palace . . . 205
Picadero del Club de Campo . . . 209
Paso en la A–6 en Torrelodones . . . 215
Paso en la A–6 en La Navata . . . 217
La Gran Mezquita de Córdoba . . . 219
La iglesia de Myyrmäky . . . 225
Edificio CNIT, París . . . 227
The Iron Bridge en Coalbrookdale . . . 231
El Pont les Arts . . . 233
La iglesia de San Marcos . . . 235
El sistema Junkers tipo lamela . . . 241
Estructuras aeronáuticas . . . 243
Nave industrial en Bravo Murillo . . . 245
Nave industrial prefabricada . . . 247
Pórtico sobre autopista en Munich . . . 249
Pórticos de acero . . . 251
Escalera helicoidal de Andrade . . . 253
Centro Cultural Villanueva de la Cañada . . . 259
Pasarela Padre Arrupe . . . 261
San Miguel de la Escalada . . . 265
Canal del Cornatel . . . 269
Vapor Aymerich . . . 271
Pabellón cubierto . . . 273
El arco encamonado . . . 275
Monasterio de Yuste . . . 287
Estación Central de Copenhague . . . 289
Estación Central de Malmö . . . 293
Cúpula del crucero, Catedral de Ely . . . 295
Aviario Snowdon . . . 299
Pérgola del Forum . . . 303
Panteón de Roma . . . 305
Gimnasio Alemán de Londres . . . 309
La nueva cúpula del Reichstag . . . 311
Fundación Ford de Nueva York . . . 315
Cubierta del Patio del British Museum . . . 317
Cubierta pista de tenis, Heimberg . . . 319
Almacén de aduanas en Chiasso . . . 321
El puente de Schwandbach . . . 323
El *Eden Garden* . . . 325
El Royal Albert Bridge . . . 331
La estación de Paddington . . . 335

El Polydôme, Universidad de Lausanne 337
EXPO–Dach de Hannover 341
Los paraguas de Amancio Williams 351
Pabellón Exposición Universal de Bruselas, 1958 355
Plaza del Paraguas 359
Mercado de Pola de Siero 363
El puente del Milenio de Londres 369
Wiener Riesenrad y London Eye 375
Puente colgante sobre el Danubio 381
Epílogo 383
Bibliografía 385

Índice de figuras

1. Escalera de Villa Saboya. *Villa Saboya staircase.* 2
2. Hill schooll, Taliesin. *Hill schooll, Taliesin.* 8
3. Taliesin. *Taliesin.* 22
4. Fundación Ford de Nueva York. *New York Ford Fundation.* 23
5. Sagrada Familia, exterior de las escuelas. *Sagrada Familia, exterior view.* 24
6. Interior de las escuelas. *Interior view.* 24
7. Bodegas Ysios en fase de construcción. *Ysios winery under construction.* 26
8. Unidad de montaje de la estructura de madera de cubierta. *Erection unit of roof structural wood under construction.* 26
9. Detalle de base de soporte de hormigón. *Detail of concrete supports base.* 28
10. Plieges en la cubierta. *Folds in the cover.* 30
11. Vista inferior de las plieges de cubierta. *Inferior view of folds in cover.* 30
12. Vista general. *General view.* 30
13. Uniones mediante piezas galvanizadas de los elementos de madera en cubierta. *Galvanised metal brackets on the wooden roof structure.* 31
14. MUSAC, vista exterior. *MUSAC, exterior view.* 32
15. MUSAC, planta baja. *Ground floor plan.* 32
16. Sagrada Familia, vista desde cerca de la Torre de Collserola. *The Sagrada Familia, view from close to the Collserola Tower.* 34
17. Planta de la Sagrada Familia. *The ground plan of the Sagrada Familia.* 34
18. Maqueta con la sección tipo de la nave. *Model with the cross section.* 36
19. Vista inferior de la nave central acabada. *Inferior view of the nave.* 36
20. Sección transversal. *Cross section.* 37
21. Naves lateral y central. *Side and center nave.* 38
22. Detalle de los soportes. *Detail of pillars.* 38
23. Modelo funicular realizado para determinar la inclinación de soportes y torres. *Funicular model for determine the slope of pillars and towers.* 39
24. Parque Güell, cornisa de la sala hipóstila. *Parque Güell, cornice of the hypostyle hall and sculpture.* 40
25. Galería semienterrada. *Semi-subterranean gallery.* 40
26. Vano doble en la sala hipóstila semienterrada. *Semi-subterranean hypostyle hall.* . . . 42
27. Sala hipóstila semienterrada. *Semi-subterranean hypostyle hall.* 43
28. Maison de l'Homme, Zürich. *Maison de l'Homme, Zürich.* 44
29. Detalles del cerramiento. *Facade detail.* 44
30. Detalles de la malla metálica que forma el cuerpo principial. *Details of the metal grid that forms the main body.* 44
31. Villa Saboya, fachada sur. *Villa Savoya, exterior views.* 46
32. Patio interior desde el salón. *Terrace view from the living room.* 46
33. Interior del salón. *Living room interior.* 46
34. Ronchamp; vista exterior de fachadas sur y este. *Ronchamp, exterior view facades south and east.* 48

35. Fachadas norte y este. *North and east facades.* 48
36. Exterior de los tragaluces. *Exterior view of skylights.* 50
37. Campanario en el suelo, con las antiguas campanas. *The belfry at ground level with the old bells* 50
38. Interior de la nave. *Interior view.* 51
39. Muros gruesos con vidrieras coloreadas. *Thick walls with coloured glasses.* 51
40. Capilla de la Resurrección, vista interior. *The Chapel of the Resurrection, interior view.* 52
41. Vista interior, galería entre la nave y el exterior. *Interior view of gallery between the nave and exterior.* 52
42. Exterior del ventanal que ilumina el altar. *Exterior views of the large window that illuminates the altar.* 52
43. Aeropuerto de Stuttgart, vista interior. *Stuttgart airport, interior view.* 54
44. Detalle de un nudo del soporte. *Detail of a joint in pillars.* 54
45. Multihalle Manheim, vista interior general. *Multihalle Manheim, general interior view.* 56
46. Detalle de la retícula de madera. *Detail of the wooden grid.* 56
47. Detalles de borde. *Detail of the edge.* 56
48. Olympiaturm, Munich. *Olympiaturm, Munich.* 58
49. Torre de Collserola. *Collserola Tower.* 60
50. Detalle de anclaje de cables. *Cables anchorage.* 60
51. Planta de las instalaciones deportivas de las Olimpiadas de Munich de 1972. *Ground plan of the sports facilities for the 1972 Munich Olympic Games.* 62
52. Vista general del parque olímpico desde la torre de comunicaciones. *General view of the Olympic park from the Communications tower.* 62
53. Componente estructural básico del estadio. *Basic structural component of the stadium.* 62
54. Imagen de uno de los anclajes de borde. *Photograph of one of the edge anchorages.* . 64
55. Paneles de plexiglas. *Plexiglas panels.* 64
56. Apoyo de los paneles de plexiglas. *Support of plexiglas panels.* 64
57. Detalles de borde y transición de cables. *Details of the edge and cable transition.* . . 66
58. Estructura de hormigón del graderío bajo la cubierta. *The concrete structure of the stands under the roof.* 66
59. Vista interior de la piscina. *Interior view of the swimming pool.* 66
60. Vistas de las zonas del graderío sin cubierta. *Views of parts of the stands without the roof.* 68
61. Vistas de las zonas del graderío con cubierta. *Views of parts of the stands with the roof.* 68
62. Estadio olímpico, vista general. *The Olympic stadium, general view.* 70
63. Allianz Arena, vista general. *Allianz Arena, general view.* 72
64. Accesos y fachada del estadio. *Access and facade.* 72
65. Interior del estadio. *Stadium interior.* 74
66. Distribuidores del graderío. *Stand entrances.* 74
67. Detalle de los elementos de fachada. *Detail of facade elements.* 75
68. Puente sobre el rio Sil cerca de Ponferrada. *Bridge over the river Sil close to Ponferrada.* 76
69. Construcción de un extremo de las celosías. *The construction of both halves at the sides of the span.* 76
70. Detalles de la unión de la cercha y el tablero. *Details of the beam joint.* 76
71. Edificio Media-TIC, vista exterior. *The Media–ITC Building, exterior view.* 78
72. Detalle de las celosías. *Detail of trusses.* 78
73. Pasarela en Viamala, vista general. *Viamala footbridge, general view.* 80
74. Detalle de la estructura de banda tesa. *Detail of stressed ribbon structure.* 80
75. Pirámide de acceso. *The entry pyramid.* 82
76. Vista interior del emparrillado. *Interior view of the grid.* 82

77. Detalle del emparrillado. *Detail of the grid.* 82
78. Ampliación del Louvre: vista interior cerca de la pirámide *Louvre expansion: interior view close to the pyramid.* 83
79. Iglesia de la Fuencisla, vista interior general. *Fuencisla Church, general interior view.* 84
80. Vista en detalle de los casetones de cubierta. *Detailed view of the coffered ceiling.* . 84
81. Detalle de unión de los perfiles tubulares metálicos. *Detail of the joint between metal tubular sections.* 84
82. Las atarazanas, interior de una nave. *Shipyards, interior view of one of the modules.* 86
83. Vista en detalle del arco. *Detailed view of the arch.* 86
84. Las atarazanas de Barcelona, maqueta del conjunto. *Barcelona shipyards, model.* . . 87
85. Ayuntamiento de Säynätsalo, vista exterior. *Säynätsalo Town Hall, exterior view.* . . 88
86. Vista del patio interior. *Courtyard view.* 88
87. Detalle de las cerchas. *Detail of the trusses* 89
88. Vivienda en Muuratsalo, entreplanta. *Home in Muuratsalo, mezzanine.* 90
89. Patio de la vivienda. *Housing court.* 90
90. Vista exterior de la vivienda. *Exterior view of the house.* 91
91. Universidad de Jyväskyla, vista del acceso. *Jyväskyla University, access view.* 92
92. Vigas convexas. *Convex beams.* 92
93. Salón de actos. *Assembly hall.* 92
94. Vista general del edificio. *General view of the building.* 93
95. Cerchas de la mensa. *Mensa trusses.* 94
96. Maqueta del Mueso Aalto de Säynätsalo. *Model of the Aalto Museum, Säynätsalo.* . . 94
97. Cerchas de la mensa. *Mensa trusses.* 95
98. Villa Mairea, vista exterior. *Villa Mairea, exterior view.* 96
99. Soportes de la pérgola del jardín. *Supports at the garden pergola.* 96
100. Pérgola del jardín. *Garden pergola.* 96
101. Detalles de la escalera principal. *Details of the main staircase.* 98
102. Detalles del apoyo de la escalera. *Details of the support of main staircase.* 98
103. Vista general de la escalera principal. *General view of the main staircase.* 99
104. Capilla de Saint Benedict, vista exterior del acceso. *Saint Benedict 's chapel, exterior view of the access.* 100
105. Vista exterior. *Exterior view.* 100
106. Uso del nudo rígido en madera. *Use of a rigid wooden joint.* 102
107. Uso del nudo rígido en madera. *Use of a rigid wooden joint.* 102
108. Vista interior de la cubierta. *Interior view of the cover.* 103
109. Vista de los jardines desde uno de los pabellones. *View of the gardens from one of the pavilions.* 104
110. Monolitos usados como pasarelas. *Monoliths used as footbridges.* 105
111. Vista exterior del pabellón principal. *Exterior view of the main pavilion.* 106
112. Pequeña pasarela de madera. *Small wooden footbridge.* 107
113. Bajocubierta vista del templo Daitokuji, Kyoto. *Roof frame of Daitokuji temple, Kyoto.* 108
114. Puertas que funcionan como particiones móviles. *Doors which function as mobile partitions.* 109
115. Kulturhuset, Estocolmo, vista del exterior. *Kulturhuset, Stockholm, exterior view.* . . . 110
116. Vista interior. *Interior view.* 110
117. Detalle de la estructura tipo. *Detail of the standard structure.* 110
118. Centro de Prensa y Difusión Shizuoka, Tokyo. *Shizuoka Press and Diffusion Centre, Tokyo.* 112
119. Gimnasio Yoyogi, edificio principal. *Yoyogi Gymnasium, main building.* 114
120. Acceso al edificio principal. *The access to the main building.* 114
121. Detalle de articulaciones esféricas. *Detail of spherical joints.* 114
122. Vista interior del edificio principal. *Interior view of the main building.* 116

123. Portal de acceso del templo Daitokuji de Kyoto. *The door into the Daitokuji temple in Kyoto.* . . . 116
124. Vista interior del gimnasio pequeño. *Interior view of the smaller gymnasium.* . . . 116
125. Vista aérea. *Aereal view.* . . . 118
126. Vista del interior de la gran sala. *Interior view ot the great hall.* . . . 118
127. Estructura de la cúpula ya izada. *The dome structure raised.* . . . 120
128. Construcción de la cúpula antes del izado. *Constructing the dome before raising it.* . . 120
129. Biblioteca Municipal de Usera. *Usera municipal library.* . . . 122
130. Viga formando un peto. *Beam that forms a protective wall.* . . . 124
131. Vista interior de la biblioteca. *Interior view of the library.* . . . 125
132. Vista aérea del mercado de Santa Catalina. *Santa Catalina; view from above.* . . . 126
133. Fachada principal. *Main facade.* . . . 126
134. Planta con el esquema de la estructura principal. *Floor plan with diagram of the main structure.* . . . 126
135. Vista aérea de la obra en fase de construcción. *Aereal view under construction.* . . . 128
136. Vista interior de la cubierta. *Interior view of the cover.* . . . 128
137. Vigas laterales de hormigón postesado sobre las que apoyan los arcos centrales. *Lateral prestressed concrete beams that support central arches.* . . . 129
138. Fachada trasera, borde de cubierta. *Rear facade, edge of the fold.* . . . 130
139. Fachada trasera, borde de cubierta. *Rear facade, edge of the fold.* . . . 130
140. Mosaico que acaba la cubierta. *The mosaic finish on the roof.* . . . 131
141. Palazzo del Lavoro, sala principal. *Lavoro Palace, main hall.* . . . 132
142. Fachada del Palazzo. *Palazzo facade.* . . . 132
143. Arranque de los voladizos. *The base of the cantilevers.* . . . 134
144. Despiece de los voladizos tipo. *Pattern of the standard cantilevers.* . . . 134
145. Detalle de esquina de los aleros de los tempos de Toji (izqda.) y Daitokuji (dcha.), Kyoto. *Detail of the corner of the eaves of Toji temple (left) and Diatokuji temple (right), Kyoto.* . . . 136
146. Ampliación de la Estación de Atocha. *Atocha Railway Station extension.* . . . 136
147. Ópera de Sydney, vista del solar antes de su construcción. *Sydney Opera, view of the site before the construction.* . . . 138
148. Enclave en la bahía, fotos actuales desde el centro de la ciudad. *View of the bay now from the city centre.* . . . 138
149. Vista aerea del edificio de la ópera. *General view of the opera building.* . . . 139
150. Vista de los arcos en abanico y de la cerámica que acaba el cerramiento al exterior. *View of fan arches and the ceramic finish on the outside.* . . . 140
151. Perspectiva del concurso. *Competition perspective.* . . . 140
152. Vista lateral desde el puente, planos de concurso e imagen actual. *Side view from the bridge, competition plans and view now.* . . . 142
153. Alzado a la bahía, planos de concurso e imagen actual. *Vertical view from the bay, competition plans and view now.* . . . 143
154. Acceso lateral desde el centro de la cuidad. *Side entrance from the city centre.* . . . 144
155. Despiece geométrico de las cubiertas con base en la misma esfera. *Geometrical breakdown of the roofs based on the same sphere.* . . . 145
156. Ópera de Sydney, estructura de la gran cistalera con vistas a la bahía. *The structure of the large window looking over the bay.* . . . 146
157. Barajas, T4, cubierta de los diques. *T4 in Barajas, view of the cover.* . . . 148
158. Vista de la terminal de viajeros. *View of the lounge.* . . . 148
159. Barajas T4, vista del terminal. *General view of terminal.* . . . 149
160. Módulo de los diques. *Module of the pier.* . . . 150
161. Fachada con estructura tensada. *Facade with the tensed structure.* . . . 151
162. Detalle de la fachada con estructura tensada. *Detail of tensile facade structure.* . . . 152
163. Museo Guggenheim, New York. *Guggenheim museum in New York.* . . . 154

164. Vista exterior del museo. *Exterior view of the museum.* 156
165. Vista del interior. *Interior view.* 157
166. Vista exterior del museo. *Exterior view of the museum.* 158
167. Vista del interior. *Interior view.* 159
168. Centro de arte británico en Yale. *Center for British Art.* 160
169. Vista de uno de los patios. *View of one of the interior courts.* 162
170. La casa del Fascio de Terragni. *Casa del Fascio by Terragn.* 163
171. Capilla en Otaniemi, vista exterior. *Exterior view of Otaniemi chapel.* 164
172. Cerchas de cubierta. *Covert truss.* 164
173. Viviendas en Rafael Calvo, esquema del cambio de modulación, en dos etapas 166
174. Viviendas en Rafael Calvo, fachada a calle (izqd.) y vista parcial de fachada trasera. *Flats in Rafael Calvo, the street facade (left) and a partial view of the rear facade (right).* 168
175. Planta tipo de viviendas (izquierda) y de garage (derecha). *Standard floor plan of flats (left) and of the garage (right).* 168
176. Sección transversal de las viviendas en Núñez de Balboa, con el cambio de modulación en el techo de planta primera. *Cross section of the flats in Núñez de Balboa, with the change of module in the first floor.* 169
177. Viviendas en Arturo Soria, vista del patio de manzana. *Arturo Soria homes, view of the block patio.* 170
178. Vista de la planta baja. *View of the ground floor.* 170
179. Sección tipo y planta general. *Standard cross-section and floor plan.* 170
180. Viviendas en Fuencarral, vista aérea general. *Flats in Fuencarral, aereal view.* . . . 172
181. Planta de viviendas. *General plan.* 172
182. Planta de vivienda tipo. *Plan floor.* 174
183. Losas de las viviendas tipo (izqda.) y del garaje (drcha). *Floor slabs of the standard homes and of the garage (right).* 176
184. Planta de garaje. *Garage plan.* 176
185. Sección transversal en que se aprecia el cambio de modulación en planta baja. *Cross section in with change of modul can be seen.* 177
186. Edificio de Industriales, cercha tipo de 15 m de luz. *Standard beam spanning 15* m. . 178
187. Planta Edificio de Industriales, Univ. Carlos III en Leganés. *Floor plan of the Industrial Engineering Building, Carlos III University, Leganés.* 178
188. Detalle tipo de unión entre diagonales y cordones en la cercha. *Detail of standard joint between diagonals and booms in the beam.* 180
189. Modulación de 7,5 m de luz con dos ordenes y perfiles doble T en continuidad. *Modulation with a span of 7.5* m *with two orders of double T-sections in continuity.* . . 180
190. El puente peatonal Allmandring. *Allmandring footbridge.* 182
191. Vista inferior. *View under the bridge.* 182
192. Anclaje al terreno de estribos para el pretensado del tirante. *Anchorage of the abutments to the ground to pre-tense the brace wire.* 182
193. Fábrica Boots, vista general. *The Boots Building, general view.* 184
194. Soportes con capitel y ábaco. *Supports with capital and abacus.* 184
195. Patios interiores cubiertos. *Covered interior patios.* 184
196. La Filarmónica de Berlín, interior de la sala sinfónica. *The Berlin Philharmonic building, interior of the concert hall.* 186
197. La Filarmónica de Berlín, cerramientos de fachada y lámparas de la sala sinfónica. *Detail of the cladding on the facade and lamps in the concert hall.* 188
198. Escaleras del vestíbulo de la sala sinfónica. *Stairs running from the entrance hall to the concert hall.* 188
199. Vestíbulo de la sala sinfónica. *Concert hall vestibule.* 189
200. La Nueva Galería Nacional, vista general de la planta de acceso. *The New National Gallery, general view of the entry level.* 190

201. Zócalo y patio lateral. *Base and side patio.* . . . 192
202. Detalle tipo del emparrillado. *Standard detail of grid.* . . . 194
203. Detalles de cabeza y pie de los soportes. *Details of the top and bottom of supports.* . 196
204. Detalle de la carpintería. *Detail of the metalwork.* . . . 198
205. Cubierta de la estación de ferrocarril de Leuven. *Leuven railway station roof.* . . . 200
206. Interior de la estación. *View from the inside of the railway station.* . . . 200
207. Vista exterior de Palm House. *Exterior view of Palm House.* . . . 202
208. Detalle de la estructura exterior. *Exterior structure detail.* . . . 202
209. Vista general de Palm House. *General view of Palm House.* . . . 203
210. Boceto del proyecto del Crystal Palace. *Sketch of the Cristal Palace.* . . . 204
211. Vista exterior del Crystal Palace. *Exterior view of the Cristal Palace.* . . . 204
212. Planta general del proyecto. *Palace plan.* . . . 205
213. Interior del Crystal Palace. *Interior view of the Palace.* . . . 206
214. Picadero del Club de Campo, vista interior y de la fachada norte. *Casa del Campo Riding School, interior view and north facade.* . . . 208
215. Imagen del montaje de la estructura. *Erecting the structure.* . . . 208
216. Detalle del nervio principal tipo de la cubierta. *Detail of the standard main roof rib.* 210
217. Esquema general de anclaje de la cubierta. *General pattern of the roof anchorage.* . 210
218. Vista de la fachada oeste. *View of west facade.* . . . 211
219. Placa prefabricada tipo de cubierta. *Standard prefabricated roof slab.* . . . 212
220. Módulo tipo y detalle de arriostramiento lateral. *Standard module and detail of lateral bracing.* . . . 212
221. Detalle de cabeza de montantes de fachadas este y oeste. *Detail of east and west facade upright head.* . . . 213
222. Puente sobre la Autovía A-6 en Torrelodones. *Bridge over the A-6 motorway in Torrelodones.* . . . 214
223. Detalle del apoyo. *Detail of the support.* . . . 214
224. Puente sobre la A–6 cerca de Galapagar. *Bridge over the A–6 near Galapagar.* . . . 216
225. Detalle de los soportes. *Detail of the support.* . . . 216
226. Mezquita de Córdoba, naves de la primera etapa. *Cordoba Mosque, First stage naves.* 218
227. Acceso al patio y entrada hacia la sala. *Access to the patio and entry into the hall.* . 219
228. Patio de los Naranjos. *Patio of the Orange Trees.* . . . 220
229. Cúpula del Mihrab. *Mihrab dome.* . . . 220
230. Soportes y arquerías de una de las ampliaciones. *Supports and a series of arches in one of the expansions.* . . . 222
231. La iglesia de Myyrmäky, vista del altar. *Myyrmäky church, view of the altar.* . . . 224
232. Techo de la iglesia con lucernarios. *Cover of the church with skylight.* . . . 224
233. Imagen exterior de la iglesia. *Exterior view of the church.* . . . 225
234. Vista exterior del CNIT, París. *Exterior view of the CNIT, Paris.* . . . 226
235. Vista interior con los añadidos recientes. *Interior view with the new buildins added.* 228
236. Fachada acristalada. *Glazed facade.* . . . 228
237. Detalle de la fachada. *Facade detail.* . . . 229
238. Vista general de The Iron Bridge. *General view of the Iron Bridge.* . . . 230
239. Arranque de los arcos. *Start of the arches.* . . . 230
240. Detalle de las barras. *Detail of bars.* . . . 231
241. Vista de los 7 arcos del nuevo Pont les Arts. *View of the 7 arches of the new Pont les Arts.* . . . 232
242. Detalle del arranque de un arco. *Detail of the start of an arch.* . . . 232
243. Iglesia de San Marcos, atrio. *Saint Mark's Church, atrium.* . . . 234
244. Fachadas de ladrillo. *Brickwork facades.* . . . 234
245. Bajorelive realizado en el pavimento con la imagen de San Marcos. *Low relief in the pavement with San Mark image.* . . . 235

246. Estructura de los espacios secundarios del edificio pricipal. *Structure of the main building.* . . . 236
247. Detalle de la marquesina de madera laminada del patio. *Detail of the patio canopy.* 236
248. Nave principal de la Iglesia. *Main nave of the church.* . . . 237
249. Nave principal de la Iglesia. *Main nave of the church.* . . . 237
250. Nave principal de la Iglesia. *Main nave of the church.* . . . 238
251. Módulo de la cubierta de la nave principal. *Module of the main nave.* . . . 238
252. Estructura del edificio administrativo. *Structure of the administrative building.* . . . 239
253. El sistema Junkers tipo lamela. *Junkers' lamela type system.* . . . 240
254. Detalle de la unión. *Detail of a joint.* . . . 240
255. Estructura del Junkers Ju 52. *Junkers Ju 52, structure.* . . . 242
256. Detalle de la estructura del Junkers Ju 52. *Junkers Ju 52, detail of the structure.* . . . 242
257. Estructura del fuselaje del Airbus A320. *Airbus A320 structure.* . . . 242
258. Detalle de las barras del Junkers Ju 52. *Detail fo bars of Junkers Ju 52.* . . . 243
259. Cubierta de nave industrial en Madrid. *Industrial building cover in Madrid.* . . . 244
260. Detalle del extremo de la nave. *Detail of the end of the nave.* . . . 244
261. Nave industrial prefabricada de hormigón, detalle de empotramiento de viga y soporte. *Prefabricated concrete industrial building, detail of how the beam and support fit together.* . . . 246
262. Detalle de la viga, acartelada y con sección variable. *Detail of the variable cross-section corbelled beam.* . . . 246
263. Vista general de la estructura de la nave. *General view of the structure of the building.* 247
264. Pórtico sobre autopista, Munich. *Portico over motorway, Munich.* . . . 248
265. Detalle del cordón superior. *Detail of the top boom.* . . . 248
266. Uniones en el extremo del cordón superior. *Joints at the edge of the top boom.* . . . 248
267. Unión en el extremo del cordón inferior. *Joints at the edge of the bottom boom.* . . . 249
268. Sistema COMONOR para naves industriales. *COMONOR system for industrial buildings.* . . . 250
269. Pórtico tipo A-5 del sistema. *A-5 type portico of the system.* . . . 250
270. Agunas de las soluciones de cerramiento de cubierta y fachada. *Some solutions for covering the roof and facade.* . . . 250
271. Monasterio de Santo Domingo de Bonaval. *Santo Domingo de Bonaval monastery.* . . . 252
272. Situación de la escalera en el monasterio y sección. *Plan showing its location in the monastery and cross-section.* . . . 252
273. Vista interior. *Interior view.* . . . 254
274. Vista interior. *Interior view.* . . . 255
275. Detalle de los peldaños. *Detail of the steps.* . . . 256
276. Esquema estructural quasi-funicular: (a) equilibrio de fuerzas en el nervio central, (b) y (c) equilibrio de fuerzas en el plano horizontal. *Quasi-funicular structural pattern: (a) balance of forces at the central rib, (b) and (c) balance of forces in the horizontal plane.* . . . 256
277. Arranque de la escalera de Andrade. *Start of the staircase.* . . . 257
278. Centro Cultural de Villanueva de la Cañada, nave principal. *Main building* . . . 258
279. Pasarela Padre Arrupe. *Padre Arrupe footbridge.* . . . 260
280. Esquema estructural en proyección vertical. *Structural form in elevation.* . . . 262
281. Esquema de la sección tipo. *Standard cross-section.* . . . 262
282. Esquema estructural espacial. *Spatial structural form.* . . . 262
283. San Miguel de la Escalada, fachada principal. *San Miguel de la Escalada, main facade.* . . . 264
284. Vista interior general, con el techo de la nave lateral, y la cubierta de la nave principal. *General interior view, with the ceiling of an aisle and the roof of the nave.* 264
285. Planta de la iglesia. *Floor plan.* . . . 265

286. Arcos que separan transepto y naves. *Arches separating the nave and aisles from the transept.* . . . 266
287. Ábside de la cabecera. *Sanctuary apse.* . . . 267
288. Acueducto del Canal del Cornatel en Ponferrada. *Cornatel Canal aqueduct, Ponferrada.* 268
289. Arcos de apoyo. *Arches of the canal.* . . . 268
290. Junta entre tramos. *Expansion joint.* . . . 269
291. El Vapor Aymerich, nave principal. *Vapor Aymerich, main hall.* . . . 270
292. Módulo de la cubierta. *Roof module.* . . . 270
293. Cubierta de chapa grecada de gran canto. *Broad edged corrugated sheet metal roof.* 272
294. Detalle del apoyo extremo. *Detail of the edge support.* . . . 272
295. Tirantes entre los extremos y la clave. *Braces added between the ends and the crown.* 272
296. Unión tipo de camones. *Standart union.* . . . 274
297. Puente diseñado por Perrault, Paris. *Bridge designed by Perrault, Paris.* . . . 274
298. Enlace por solape de un mástil de un barco. *Overlapping join in a ship's mast.* . . . 276
299. Esquema estructural del forjado descrito en el tratado de Serlio. *Structural scheme for the floor by Serlio.* . . . 276
300. Iglesia de Torija, España. *Torija parish church, Spain.* . . . 278
301. Iglesia de Mocejón, España. *Mocejón parish church, Spain.* . . . 278
302. Iglesia de Mocejón, España. *Mocejón parish church, Spain.* . . . 278
303. Iglesia de St. Gallus, Alemania. *St. Gallus church, Germany.* . . . 280
304. Catedral de Ica, Perú. *Ica Cathedral, Peru.* . . . 280
305. Esquemas estructurales de la catedral de Ica. *Structural forms in Ica Cathedral.* . . . 280
306. La *Nave de blanqueo*, España. *The Nave de Blanqueo.* . . . 282
307. Hall de la Estación central de Copenhague. *Copenhagen Central Station hall.* . . . 282
308. Estructura tipo *Ardant* del Hall de la Estación central de Copenhague. Ardant *truss structure in Copenhagen Central Station hall.* . . . 283
309. Estructura tipo *Ardant* del Hall de la Estación central de Copenhague. Ardant *truss structure in Copenhagen Central Station hall.* . . . 283
310. Esquema estructural del *sistema Zollinger*. *The structural pattern of the Zollinger system.* . . . 284
311. Picadero en la afueras de Copenhague construido con el *sistema Zollinger*. *Riding school in the outskirts of Copenhagen built using the Zollinger system.* . . . 284
312. Detalle de la cubierta. *Cover detail.* . . . 284
313. Cúpula basada en el principio del arco encamonado. *Dome based on the principle of the wooden framed arch.* . . . 285
314. Monasterio de Yuste, galería de acceso en la fachada a los jardines. *Yuste Monastery, entrance gallery in the garden facade.* . . . 286
315. Forjado de techo de la galería de acceso desde los jardines. *Roof framework in the entrance gallery of the garden facade.* . . . 286
316. Estación de Copenhague, sección. *Copenhagen station, cross-section* . . . 288
317. Vista general de la cubierta. *General view of the cover.* . . . 288
318. Detalle de correas y pares. *Detail of the purlins and rafters.* . . . 290
319. Arranque de los arcos. *The base of the arches.* . . . 290
320. Detalle del sistema Stephan. *Detail of the Stephan system.* . . . 291
321. Estación Central de Malmö, sección por los andenes. *Malmö Central station, cross section.* . . . 292
322. Imagen de los andenes. *View of the platforms.* . . . 292
323. Detalle de arranque de los arcos. *Detail of the bottom of the arches.* . . . 292
324. Catedral de Ely, vista general y del exterior de la linterna. *General view and the outside of the lantern.* . . . 294
325. Maqueta de la estructura de la cúpula de madera y su linterna. *Model of the structure of the wooden tower and lantern.* . . . 295

326. Interior de la cupula de madera y su linterna. *View of the wooden octagon and the lantern.* . . . 296
327. Cúpula y plementería en madera. *Timber structure of the tower and roof in wood.* . 296
328. Génesis de la planta octogonal por eliminación de los cuatro soportes centrales del crucero: estado original (izquierda) y reformado (derecha). *Genesis of the octagonal floor plan by eliminating the four central piers of the transept: the original state (left) and the modified one (right).* . . . 297
329. El aviario Snowdon, vista general. *Snowdon Aviary, general view.* . . . 298
330. Esquema estructural. *Structural pattern.* . . . 298
331. Cerramiento de malla de acero. *Steel mesh enclosure.* . . . 300
332. Detalle de unión de esquina de los tetraedros. *Detail of the tetrahedron corner joint.* 300
333. Voladizo de la pasarela en zigzag. *The raised zigzag walkway.* . . . 300
334. Tetraedros colgados desde los soportes en **V**. *Tetrahedrons hanging from **V**–shaped supports.* . . . 301
335. Pérgola del FORUM 2004. *The FORUM 2004 pergola.* . . . 302
336. Detalle del extremo del voladizo. *Detail of the edge of the cantilever.* . . . 302
337. Cúpula del Panteón de Roma. *Dome of the Panteon in Rome.* . . . 304
338. Cúpula del Panteón de Roma. *Dome of the Panteon in Rome.* . . . 306
339. Vista exterior del Gimnasio Alemán. *Exterior view of the German Gymnasium.* . . . 308
340. Vista general interior de la cubierta. *General interior view of the roof.* . . . 308
341. Apoyo de las vigas de cubierta. *The bottom of the roof beams.* . . . 308
342. El incendio del Reichstag de 1933. *The Reichstag fire in 1933, with its metal dome burning.* . . . 310
343. El Reichstag y la cúpula acristalada. *The new Reichstag with its glass dome.* . . . 310
344. Rampa y sistema de paralelos y meridianos. *Ramp and the system of parallel and meridian rings.* . . . 312
345. Rampas helicoidales. *Helicoidal ramps.* . . . 312
346. La Fundación Ford de Nueva York. *The Ford Foundation, New York* . . . 314
347. Cubierta del patio del British Museum. *Patio roof of British Museum.* . . . 316
348. Detalle de esquina. *Detail of a corner.* . . . 316
349. Vista general del centro de Tenis en Heimberg. *Tennis Centre in Heimberg, general exterior view.* . . . 318
350. Una estructura modular. *Modular structure.* . . . 318
351. Vista interior general. *General interior view.* . . . 318
352. Vista exterior del almacén de aduanas en Chiasso. *Exterior view of the douane building in Chiasso.* . . . 320
353. Alzado del pórtico. *Frame elevation.* . . . 320
354. Diagrama funicular. *Funicular diagram.* . . . 320
355. Diagrama de fuerzas. *Force diagram.* . . . 320
356. Vista del puente de Schwandbach. *View of the Schwandbach bridge.* . . . 322
357. Esquema en planta de la mitad de la estructura. *Horizontal plan of half of the structure.* . . . 322
358. Esquema en perspectiva de media estructura. *Perspective diagram of half of the structure.* . . . 322
359. Esquema en perspectiva de media estructura. *Perspective diagram of half of the structure.* . . . 322
360. Interior de la curva. *Intrados of the curve.* . . . 323
361. Vista general del Eden Garden. *General view of Eden Garden.* . . . 324
362. Esquema de la sección de la estación de Waterloo. *Diagram of the roof cross-section over the platforms of Waterloo station.* . . . 324
363. Exterior de la cubierta de la estación de Waterloo. *External view of the roof over the platforms of Waterloo station.* . . . 324
364. Arcos de intersección de las cúpulas. *Intersecting arches in the domes.* . . . 326

365. Esquema de despiece de la esfera con base en el icosaedro. *Breakdown of the sphere based on the icosahedron.* . . . 326
366. Cubierta de "pompas" de EFTE. *Cover with "bubles" of ETFE.* . . . 326
367. Vista interior. *Interior view.* . . . 328
368. Esquema del despiece tipo, en ambas capas, del teselado hexagonal. *Diagram of a breakdown of the type, in both layers, in the hexagonal tessellate.* . . . 328
369. Detalle de las uniones tipo en ambas capas. *Detail of the standard joints in both layers.* . . . 329
370. El Royal Albert bridge en Saltash. *The Royal Albert bridge in Saltash.* . . . 330
371. Los puentes Royal Albert y Tamar en Saltash. *The Royal Albert and Tamar bridges in Saltash.* . . . 330
372. El Royal Albert Bridge en Saltash. *The Royal Albert Bridge at Saltash.* . . . 332
373. Arranque del arco y unión con el tirante. *Arch and tie union.* . . . 332
374. La estación de Paddington, andenes. *Paddington station, platforms.* . . . 334
375. Arranque de los arcos. *Bottom of arches.* . . . 334
376. Vista exterior del Polydôme de Lausanne. *Exterior view of Lausanne Polydôme.* . . . 336
377. Vista del interior. *Interior view.* . . . 336
378. Detalle de las nevaduras de madera. *Detail of wooden ribs.* . . . 338
379. Detalle del arranque de la cúpula. *Detail of the base of the dome.* . . . 338
380. Vista de los nervios de borde. *View of edge ribs.* . . . 339
381. Vista general de la EXPO-Dach. *General view of the EXPO-Dach.* . . . 340
382. Maqueta del proyecto, con dos módulos más de los ejecutados. *Model with two extra modules.* . . . 340
383. Vista inferior. *View from below.* . . . 342
384. Detalle de las torre–soporte exteriores. *Detail of the exterior tower-supports.* . . . 344
385. Detalle de las torre-soporte al interior. *Detail of the interior tower-supports.* . . . 346
386. Detalle del arranque de las láminas. *Detail of the base of the shells.* . . . 346
387. Detalle de la lámina-módulo. *Detail of the shell-module.* . . . 346
388. Detalle de borde de las láminas en el extremo de las ménsulas. *Details of the shell edges at the head of the corbels.* . . . 348
389. Detalles de borde de las láminas en las esquinas. *Detail of shells edge at the corners.* 348
390. Detalle de unión entre paraguas en esquina. *Detail of the joints between the umbrella corners.* . . . 348
391. Los paraguas de Amancio Williams, solución T1 paramétrica con Grasshopper. *Amancio Williams umbrellas, parametric T1 solution using Grasshopper.* . . . 350
392. Solución T2 paramétrica con Grasshopper. *Parametric T2 solution using Grasshopper.* 352
393. Desplazamientos verticales a peso propio. *Map of vertical displacement due to its own weight.* . . . 352
394. Reconstrucción del pabellón de España en la exposición de Bruselas de 1958, vista general. *Reconstruction of the Spanish pavilion in the Brussels 1958 Expo, general view.* . . . 354
395. Vista inferior de un módulo. *View under a module.* . . . 356
396. Esquema del sistema modular. *The modular system pattern.* . . . 356
397. Marquesina de la Plaza del Paraguas, vista general. *General view of the umbrella.* . 358
398. Vista inferior de la marquesina. *View of the umbrella from below.* . . . 360
399. Vista exterior del mercado de Pola de Siero. *External view of the Pola de Siero marquet.* 362
400. Maqueta de la estructura del mercado. *Model of the structure of the Pola de Siero marquet.* . . . 362
401. Vista interior de la obra recién finalizada. *Interior view of the recently finished building.* . . . 362
402. Esquema de la estructura de la cubierta en planta. *Ground plan structural diagram.* 364
403. Mercado al aire libre bajo la marquesina exterior. *The open-air market under the exterior shelter.* . . . 364

404. Arco diagonal y arranque en la fachada principal. *Diagonal arch with its base in the facade.* 365
405. Ménsula exterior y cubierta de elementos prefabricados. *External cantilever and cover.*366
406. Arranque de los arcos en las fachadas laterales. *Standard arch bases in the lateral facades.* 367
407. Vista superior del tablero del puente. *Upper view of the bridge board.* 368
408. Vista inferior. *Lower view of the bridge.* 368
409. Anclaje del extremo junto a la nueva Tate Gallery. *Anchorage of the end next to the New Tate Gallery.* 369
410. Puentes adyacentes de Southwark (izquierda) y Blackfriars (derecha). *The neighbouring bridges of Southwark (left) and Blackfriars (right).* 370
411. Tramo tipo en el vano central. *A standard section in the middle span.* 371
412. Triangulación con un disipador de energia en el cruce de las barras y masas sintonizadas en los laterales. *Triangulation with an energy dissipater where the members cross, and tuned masses at the sides.* 371
413. Amortiguadores añadidos. *Added dampers.* 372
414. Vista general del Wiener Riesenrad. *General view of Wiener Riesenrad.* 374
415. Detalle de las cabinas del Wiener Riesenrad. *Detail of cabins of Wiener Riesenrad.* . 376
416. Vista general del London Eye. *General view of London Eye.* 377
417. Esquema de biela y tirante de apoyo del eje del London Eye. *View of the A-frame and hub reinforcing struts in London Eye.* 378
418. Cordón de sección triangular de la noria y sistema de arrastre del London Eye. *Triangular cross-section rim of the wheel and the drive system.* 379
419. Puente colgante para el paso de tuberías en Viena, vista general. *Suspension bridge for pipes in Vienna, general view.* 380
420. Vista de las torres. *View of a tower.* 380
421. Sistema de cuelgue de las tuberías. *View of how the pipes are held.* 381
422. Crucero de la catedral de Ely. *The octagon in Ely Cathedral.* 382

El papel de la estructura en el proyecto de Arquitectura

Un enfoque global

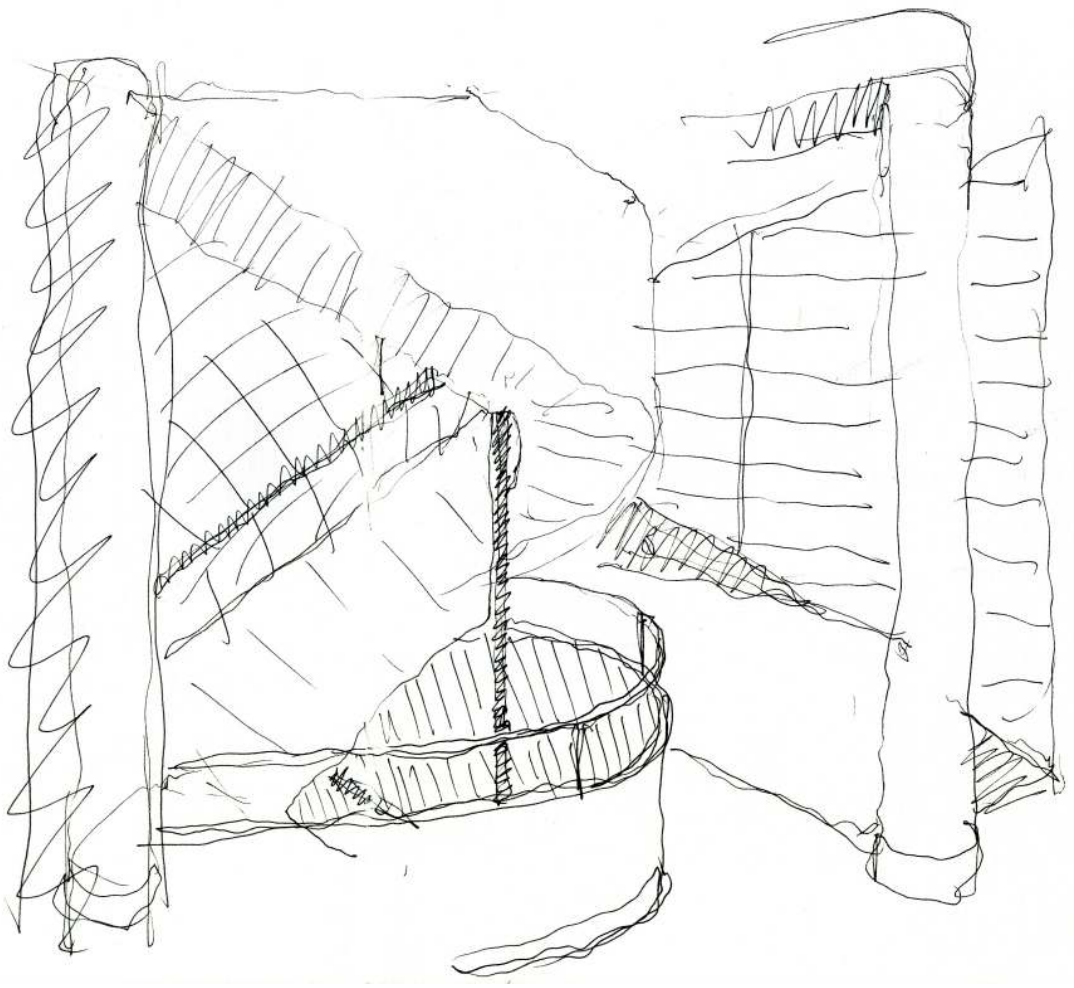


Figura 1: Escalera de Villa Saboya. *Villa Saboya staircase.*

Presentación del editor

Joaquín Antuña

Este libro forma parte de un proyecto más amplio en el que José Luis Fernández Cabo estaba trabajando. Se trata de una investigación centrada en el proyecto de arquitectura y, en concreto, a la parte estructural de las construcciones, en la manera en que se proyecta y en el modo en que se enseña la disciplina.

Este libro es una parte de ese trabajo y consiste en el estudio de casos, el análisis de edificios en los que se comenta la manera en que está resulta la estructura del edificio y como se integra en el conjunto.

Se trata del libro de un arquitecto. Un arquitecto con 25 años de ejercicio profesional realizando proyectos y colaborando con otros profesionales, centrado, en muchas ocasiones, en la estructura del edificio. Pero, además, con una amplia actividad docente e investigadora.

En el plan de estudios de arquitectura de 1996, Ricardo Aroca propuso una asignatura optativa a la que llamaron "La estructura en el proyecto arquitectónico". Desde el comienzo José Luis colaboró en el curso del que, durante varios años se impartieron varios grupos. Primero colaborando con Ricardo y en los últimos años como encargado del curso.

El origen de este libro está en el trabajo realizado en esa asignatura. En ella se proponía el estudio de edificios destacados por alguna razón, atendiendo a la manera en que está resuelta la estructura del proyecto. En los veinte años en que se impartió se comentaron gran cantidad de edificios, parte de los cuales se reflejan en el libro.

Se trata de un proyecto inacabado en el que José Luis propone una investigación sobre la manera de concebir la estructura de un edificio y como se puede organizar la docencia del proyecto de arquitectura, centrándose en la estructura y como se integra con el conjunto. Como método de trabajo, propone el estudio de casos como primera tarea y esa es la parte que se incluye en este texto.

Además del prologo que José Luis había preparado, se incluye la introducción en la que estaba trabajando y que se ha decidio dejar en el estado en que se encontraba. El texto de la introducción empieza ordenado pero, a medida que avanza, desaparece el discurso y se queda en notas, indicaciones y referencias de textos que pueden orientar el trabajo futuro. De ese modo queremos dejar patente lo inacabado del proyecto, evocando, además, la manera en que trabajaba.

José Luis visitó todas las obra que se describen, las fotografió y, en muchos casos, las dibujó. Todas las ilustraciones del texto son suyas salvo las que se indican al final de esta presentación.

Se trata de una obra notable, que tiene valor en si mismo pero, además, debería servir de estímulo para continuar la labor iniciada.

La edición se ha basado en el texto dejado por José Luis, pero se ha organizado de manera que la parte gráfica tenga una presencia importante. Por otra parte, se ha manteniendo el orden en que estaban descritas las obras.

Por último, quiero agradecer el esfuerzo que realizaron José Ignacio Hernando, Mariano Vázquez, Elisa Cantó y Miguel Gutierrez leyendo y corrigiendo las pruebas del texto y aportando además sugerencias que han hecho posible esta edición.

De las más de 400 imágenes que ilustran el libro, la mayoría son obra del propio José Luis, tanto las fotografías como los dibujos. En su nombre agradecemos a todos aquellos que permitieron el uso de las fotografías que nos han facilitado: La imagen 73 de la página 80 de Robert Widmann; Julio Martínez Calzón y el estudio de ingeniería MC2 facilitaron las imágenes 125 a 128 del Palacio de Congresos de Salamanca; de la obra del mercado de Santa Catalina, José María Velasco facilitó la imagen 134 de la página 126 y Joaquín Montón la fotografía 135 de la página 128; Ismael García Ríos facilitó las imágenes 171 y 172 de la página 164 de la capilla de Otaniemi; Ricardo Aroca facilitó las imagenes y los planos de sus proyectos, figuras desde la 180 en la página 172 a la 189 en la página 189; la imagen 215 de la página 208 del picadero del Club de Campo, y los planos que aparecen en las figuras 216, 217 y 219 han sido obtenidas del Archivo Carlos Fernández Casado del CEHOPU–CEDEX; los planos de las figuras 271 y 272 de la página 252 han sido facilitados por el estudio de arquitectura de Aránzazu Paz López, DSÑ Arquitectura; la figura 297 de la página 274 está tomada de Leupold, 1726; en el apartado del arco encamonado las fotografías de la figura 300 son de Félix Lasheras, las de las figuras 301 y 302 son de Marina Arce Blanco, las de la figura 303 se realizaron gracias a una visita de obra organizada por Philipp Dietsch de la Universidad Técnica de Munich durante las obras en marcha dirigidas por el Dr. Ing. F. Rudolf Schütz y las imágenes de las figuras 304 y 305 son de Dina D´Ayala y Carina Fonseca Ferreira; los planos de las figuras 316 y 321 proceden de Kersten, 1926; las imágenes del panteón de Roma, figuras 337 y 338 en las páginas 304 y 306, de Cristina García González y Salvador Guerrero López; las imágenes del edificio de la aduana de Chiasso, figuras 352 y 353 de la página 320 facilitadas por la ETH de Zürich y su archivo de R. Maillart; por último, las figuras 400 y 401 han sido facilitadas por la Fundación Juanelo Turriano de Madrid, en donde está depositado el archivo de Ildefonso Sánchez del Río.

Prólogo

Se puede hablar sobre la estructura de una obra de arquitectura desde muchos puntos de vista. Pero casi siempre que se hace es el especialista en estructuras, ingeniero normalmente, quien escribe. Algo, por otra parte, lógico. El arquitecto tiene una formación más generalista, por lo que su interés en la estructura está vinculado a su influencia y relación con el conjunto de la obra.

Desde hace varias décadas, desde el lado de la ingeniería se habla del *Structural Art*, y expresiones similares, para referirse a una categoría artística vinculada al arte en el manejo de la estructura. Es decir, a obras en donde el arquitecto o, más frecuentemente, el ingeniero, hacen de la estructura el protagonista de la obra, y lo hacen de forma magistral. Maillart, Isler o Candela fueron de los primeros nombres, por citar algunos, asociados a ese arte. Esta reivindicación de una categoría artística independiente arranca, finalmente, con la aparición de la Ingeniería como disciplina independiente, ligada a su vez a la nueva ciencia y a la aparición de nuevos materiales de gran resistencia. Esta última cuestión es clave. Hasta entonces, estructura y construcción son una misma cosa. De hecho, etimológicamente tienen la misma raíz.

Desde hace también varias décadas, el campo de la ingeniería estructural acuñó el término *Conceptual Design* para referirse a esas fases iniciales de concepción de la estructura que acaban marcando profundamente el resto del proceso. Se reclama con ello no solo el oficio, sino también el arte en el manejo de una herramienta técnica. El *Conceptual Design* viene en general a apoyar esa idea del *Structural Art*.

Es decir, cuando se habla de estructura, casi siempre se hace desde la visión del especialista, y además en relación con obras donde la estructura tiene un peso muy importante.

Aunque ya casi nadie defiende el enfoque funcionalista de la estructura, es decir, el hecho de que un buen funcionamiento produzca una buena estructura, se suele olvidar que, incluso en los casos en los que la estructura tiene un peso crucial en el proyecto, no se diseña una estructura sino un objeto de mucha más complejidad: una obra para un determinado fin.

It is possible to talk about the structure of a work of architecture from many different viewpoints. But the person who does so is almost always a specialist in structures and normally an engineer, which is quite logical. Architects have a more general training, so that their interest in structure is tied to its influence and relationship with a work as a whole.

Engineers have been talking about *Structural Art* for decades, as well as other similar expressions, to refer to an artistic category linked to art in how structure is handled. I.e., works in which the architect or more often the engineer places structure at the centre of a work and does so masterfully. Maillart, Isler or Candela were the first names, to mention just a few, associated with this art. Finally, this claim to be an independent artistic category emerged with the recognition that engineering is an independent discipline, linked in turn to modern science and new high-strength materials. The last point is of key importance, as until now structure and construction were the same thing. In fact they share the same etymological root.

It was also several decades ago that structural engineering coined the term *Conceptual Design* to refer to the initial phases of structural design that would profoundly influence the rest of the process. This involves the claim that art as well as expertise is needed to use a technical tool. *Conceptual Design* generally supports the idea of *Structural Art*.

Thus when we speak about structure we almost always do so from a specialist's point of view, and moreover in connection with works where structure is highly important.

Although hardly anybody now sees structure as purely functional, i.e., that good functioning will give rise to a good structure, it tends to be forgotten, even when structure plays a crucial role in a project, that it is not a structure that is being designed but something far more complicated: a work for a certain purpose.

Este texto trata de revisar obras y conceptos sobre el papel de la estructura en la obra de arquitectura (adentrándose en ocasiones en la obra civil), pero desde una perspectiva global. Es decir, mirar al conjunto y tratar de entender cómo dialoga la estructura con el conjunto de la obra, qué ponderación se le ha dado a la estructura, cómo se ha manejado, qué papel tiene la faceta técnica o científica (especialmente en la génesis de la forma). Y es que, como se decía, NO es una estructura lo que se proyecta, sino una obra, con toda su riqueza y complejidad. Es importante por ello no perder de vista el conjunto incluso cuando se mira a una parte.

Esto es todavía más patente cuando hablamos de obras modestas, en donde la estructura tiene un peso menor. Y sin embargo hay que hablar también ahí de oficio e incluso de arte en el manejo de la estructura. Y esas obras modestas son además mayoría en el total de lo construido. Prescindiendo de esas obras más modestas, uno podría llegar a concluisones sesgadas. Ahí no se aplica ese concepto de *Structural Art*. Es, nada más y nada menos, buena arquitectura o buena ingeniería.

Por otra parte, con este enfoque global no se quiere negar la importancia de la herramienta científica y técnica, del detalle, del proceso constructivo. Al constrario. Se trata de ser consciente de las decisiones tomadas y del valor que se les da. Es vital diferenciar el distinto papel que juega la estructura en el distinto tipo de obras: a veces como figurante, a veces como protagonista, con muchas posibilidades entre medias. Y desde luego, no son pocas las ocasiones en que se exige el dominio de la técnica y de la ciencia.

Al final, lo que se juzga, lo que debe tener verdadera calidad, es el conjunto de la obra, no una parte, no la estructura de forma independiente. Además, personalmente no creo que sea higiénico asociar arte a arquitectura de forma sistemática. Y tampoco creo que sea adecuado hacerlo, sistemáticamente, en relación con la ingeniería. ¿Por qué debe hacer *arte* el arquitecto o el ingeniero? ¿Es que no basta el buen oficio? Por otra parte, el oficio se puede enseñar, el arte no.

This text examines works and concepts on the role of structure in architectural works (and sometimes in civil engineering), but always as an overview. I.e., it looks at works as a whole and tries to understand the dialogue of structure with the complete work, how important it was considered to be, how it was handled, the role of technical or scientific factors (especially in the creation of the design). It is that a project is NOT about a structure but rather a whole work, in all of its richness and complexity. It is therefore important not to lose sight of the whole project, even when only one part of it is being examined.

This is even clearer when examining modest works, ones in which structure plays a lesser role. Nevertheless, even in these it is necessary to talk about expertise or even art in how structure is handled. The majority of constructed works are modest, and if we exclude them this could lead to distorted conclusions. We do not apply the concept of *Structural Art* to these modest works, as they are either good architecture or good engineering, neither more nor less.

On the other hand, this overview does not attempt to deny the importance of specific scientific and technical tools in the constructive process. On the contrary, we have to be aware of the decisions taken and the values assigned to them. It is vital to differentiate between the roles played by structure in different types of works: sometimes it is an extra, while other times it is the central character, with many possibilities between these two extremes. Of course, there are many times when expertise is needed in technical matters as well as science. At the end of the day what is judged and what really does have to be good quality is a work as a whole, not a part of it and not its structure as an independent entity. Additionally, I do not personally believe that it is a good idea to systematically link architecture and art. Nor do I believe that this should be done systematically with engineering. Why should architects or engineers do *art*? Isn't it enough to be an expert? And moreover, a trade can be taught while art cannot.

Para realizar este análisis se va a poner el foco sobre numerosas obras de muy distinto tipo. Solo con una muestra completa las conclusiones podrán ser correctas. El análisis de la obra ocupará la mayor parte del trabajo. La mayoría de las fotos son propias, fruto de muchos viajes gracias a los cuales creo que empecé a entender algo sobre arquitectura. La carrera debería comenzar con un gran viaje anual por todo el mundo.

También se analizarán textos escritos por diseñadores de estructuras y se harán reflexiones de tipo teórico. Pero como algo secundario. La obra habla, en gran medida, por sí misma y, además, valdrá para poner a prueba lo escrito, no siempre acertado.

Creo que este enfoque global es vital para conseguir un aprendizaje *completo* y *equilibrado*. Y es finalmente al estudiante de arquitectura e ingeníería, sobre todo de primeros cursos, a quién va dirigido este texto.

Soy consciente de que para alcanzar ese carácter docente hay que ampliar las explicaciones y añadir muchos dibujos. Este texto inicia, por tanto, una primera etapa de un largo camino que, casi necesariamente, otros coautores deberían compartir.

Espero, no obstante, que el boceto general que ahora se ofrece sí ayude a entender que **el oficio en el manejo de la estructura, que sí se puede enseñar y aprender, es imprescindible para el arquitecto, no es una cuestión menor**.

Lo que ya no tengo tan claro es que lo que finalmente haya escrito no sea un cuaderno de viajes en lugar de un libro de texto. Uno nunca sabe.

This analysis involves focussing on a large number of very different types of work. Only a complete sample will allow correct conclusions to be drawn, and most of the work is taken up by analysis. I took the majority of the photographs, in the journeys which I believe allowed me to start understanding something about architecture. Studies should commence with a long year's tour around the world.

Texts written by structural designers will be analysed too, and theoretical reflections will be included, although these will be secondary. Works largely express themselves and are also what texts should be judged by, as they are not always correct. I believe that this holistic approach is vital to ensure that learning is *complete* and *balanced*. This text is above all for architecture and engineering students, above all those in their first years.

I know that to make this educational, longer explanations and many more drawings will be necessary. This initial text is therefore the first stage of a long road that other authors will necessarily have to share.

Nevertheless, I hope that this overview will help readers to understand that **expertise in handling structure, which can be taught and learnt, is indispensible for architects and not a minor matter**.

What I am not so sure of is whether this book is a travel journal instead of a textbook. You never know.

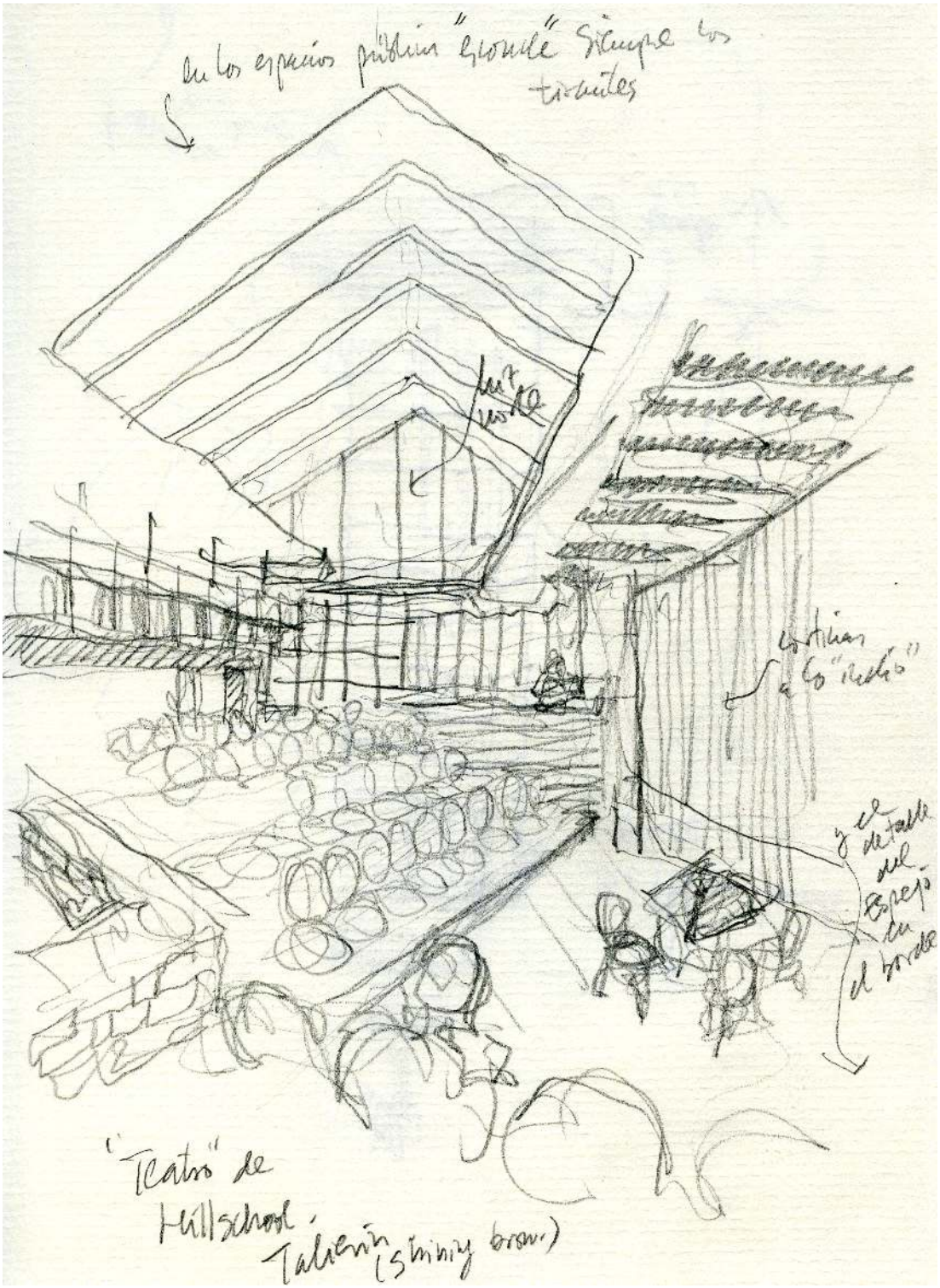


Figura 2: Hill schooll, Taliesin. *Hill schooll, Taliesin.*

Introducción

Ars ubi materia vincitur ipsa sua

¿Which is understood by *Conceptual Design of Structures*?

By *Conceptual Design of Structures* we refer now, and we have to say not very precisely, to a range of questions associated with the initial processes of structural design; and most particularly to the genesis of form. But the word *conceptual* has not always been associated with this preliminary design phase.

Thus for example the magnificent book published in 1981 by D. Fraser Fraser, 1981, in 1981, entitled "Conceptual Designs and Preliminary Analysis of Structures", uses the term *conceptual* in the very different sense of deep comprehension of theoretical concepts, over and above their mathematical description, to refer to *Structural Insight*.

In Spanish we usually use the term *"Diseño de Estructuras"* to refer to the *Conceptual Design of Structures*, and it has to be said that this term is not very precise. However, it makes no sense in English to use *Structural Design* as a synonym for this. This is because the English word *design* refers in the field of structures, and unlike *"diseño"* in Spanish, to checking and determining the dimensions of sections. Many people therefore use the term *Preliminary Design* to refer to the *Conceptual Design of Structures*. And other terms are used, too, as there is no agreement here. This fact is highly significant, as it shows the lacks of interest felt by this community not long ago in everything relating to the genesis of form. Many engineers considered it to be something that was not very relevant for them, as they centred their work on analysis, deciding dimensions and checking; i.e., *Analysis and Design*.

Ars ubi materia vincitur ipsa sua

¿Qué se entiende por *Diseño Conceptual de Estructuras*?

Con *Conceptual Design of Structures* nos referimos hoy, y hay que anticipar que de un modo poco preciso, a diferentes cuestiones vinculadas con los procesos iniciales de la concepción de la estructura, y muy particularmente a lo relativo a la génesis de la forma. Pero el vocablo *conceptual* no ha estado siempre asociado a esa fase preliminar del diseño.

Así por ejemplo, el magnífico libro de D. Fraser, publicado en 1981, y de título "Conceptual Designs and Preliminary Analysis of Structures", usa el término *conceptual* en un sentido bien distinto, refiriéndose al entendimiento profundo de los conceptos teóricos, yendo más allá de su descripción matemática (Fraser, 1981). Es decir, usando también conceptos del inglés, refiriéndose al *Structural Insight*.

En castellano hemos usado habitualmente el término *Diseño de Estructuras* para referirnos al *Conceptual Design of Structures*, y hay que decir que también de una forma poco precisa. Pero en inglés no tiene sentido usar, para lo mismo, *Structural Design*. Ello es debido a que el vocablo inglés *design* se refiere, en el ámbito estructural, y a diferencia del *diseño* en castellano, a la comprobación y dimensionado de secciones. De ahí que mucha gente usara el término *Preliminary Design* para referirse al *Conceptual Design of Structures*. Y otros términos distintos, ya que no había acuerdo. Este hecho era ya muy significativo: denotaba el poco interés que esa comunidad tenía, hace no tanto tiempo, por lo relativo a génesis de la forma. Para muchos ingenieros no era algo que tuviera que ver demasiado con ellos. Su preocupación era el análisis, el dimensionado y la comprobación, es decir, el *Analysis and Design*.

La comunidad de la *Ingeniería de Estructuras* se pone de acuerdo en el empleo del término *Conceptual Design* en el congreso anual del IASS celebrado en Stuttgart en 1996; cuyo titulo fue justamente el de "Conceptual Design of Structures". En ese congreso se dieron cita muchas de las voces más reputadas de ese campo, y de ahí su gran repercusión.

En dicho congreso, Mamoru Kawaguchi, una de las voces más autorizadas, comienza su ponencia, en el resumen, diciendo: "*The word Conceptual Design has become to be used often rather recently, but it is not clearly defined as yet. The author´s definition of the word is first proposed, and the aim of the Conceptual Design in then discussed*". Y continúa diciendo algo no menos importante: "*The reason why the word had to be stressed recently is attributed to the present situation of the architects and engineers who do not appreciate each other´s concerns nor their common interest about how their designs are realized*" (Kawaguchi, 1996).

Kawaguchi sitúa el punto de desencuentro entre arquitectos e ingenieros en el *Postmodernismo*. Dejando aparte desencuentros pasados[a], yo estoy de acuerdo con su diagnóstico. Más adelante se volverá sobre esta cuestión, ya que de hecho el análisis histórico asume el surgimiento del *Postmodernismo* como gran punto de fractura de la concepción clásica del *Diseño Conceptual de Estructuras*.

Kawaguchi define en dicha ponencia, como anticipó, aunque de forma poco precisa, qué significa para él *Conceptual Design of Structures*. Citamos aquí solo su última frase al respecto: "*When on says* Conceptual Design of Structures*, it should aim at a structure that is not merely safe, but also rationally dimensioned, economically reasonable and esthetically satisfactory*" (Kawaguchi, 1996, pag. 3). Esto recuerda mucho a la tríada vitruvina enunciada hace aproximadamente 2000 años: *firmitas*, *utilitas* y *venustas*. Y no es casualidad, ya que Kawaguchi comparte la visión de Vitruvio, como de hecho hacía toda la comunidad de la *Ingeniería de Estructuras*, de forma compacta, hasta el *Postmodernismo*. No obstante, y como se irá viendo, esa visión no es compartida hoy día por mucha gente, al menos en lo tocante a los hechos, es decir, a la obra construida.

[a]La aparición del ingeniero en Francia supone ya, *per se*, el primer y mayor "desencuetro" entre ambas profesiones, que antes no estaban separadas

The *Structural Engineering* community agreed on the use of the term *Conceptual Design* in the annual meeting of the IASS held in Stuttgart in 1996; the title of this meeting was in fact "Conceptual Design of Structures". This meeting discussed many of the best–known terms in this field, which is why it was so influential.

In this conference, Mamoru Kawaguchi, one of the highest authorities in this field, started the abstract of this paper by saying Kawaguchi, 1996: *The word Conceptual Design has become to be used often rather recently, but it is not clearly defined as yet. The author's definition of the word is first proposed, and the aim of the Conceptual Design in then discussed*. He continued by saying something that was no less important:*The reason why the word had to be stressed recently is attributed to the present situation of the architects and engineers who do not appreciate each other's concerns nor their common interest about how their designs are realized*.

Kawaguchi said that the moment when architects and engineers started to misunderstand each other occurred with *Postmodernism*. Apart from other misunderstandings in the past[a], I agree with his diagnosis. This question will be examined further below, as historical analysis assumes that the emergence of *Postmodernism* was when the separation occurred from the classical *Conceptual design of Structures*.

In his paper Kawaguchi defines what *Conceptual Design of Structures* means for him, although not very precisely Kawaguchi, 1996, page 3. Here we will only include his last phrase on this subject: *When one says* Conceptual Design of Structures*, it should aim at a structure that is not merely safe, but also rationally dimensioned, economically reasonable and aesthetically satisfactory*. This is very similar to the vitruvian triad expressed about 2000 years ago: *firmitas*, *utilitas* y *venustas*. And this is not by chance, given that Kawaguchi shares the vision of Vitruvian, as in fact the whole *Structural Engineering*community did from the first until *Postmodernism*. Nevertheless, as will be seen, many people no longer agree with this viewpoint; at least in connection with facts, i.e., constructed works.

[a]The emergence of engineering in France was, *per se*, the first and greatest "separation" between both professions, as they were not divided beforehand

Algunas precisiones sobre el término *arte*

L. Shiner Shiner, 2001 muestra en un ensayo cómo el significado actual de la palabra *arte* es relativamente nuevo. De hecho, dicho concepto no existía en el mundo grecorromano. El griego *techne* es equivalente al latino *ars*, y están asociados al buen oficio en muchos campos, incluyendo el de los trabajos manuales. No existía entonces esa categoría de las *bellas artes* separadas del resto.

Carlos Fernández Casado, al estudiar el puente romano de Alcántara, pone de relieve una de las frases que aparece en la inscripción del templo votivo que se encuentra en una de las entradas del puente: "*ars ubi materia vincitur ipsa sua*", que traduce como "*artificio mediante el cual la materia se vence a sí misma*", y que es sin duda una de las definiciones más bellas que han hecho sobre el arco de fábrica. Es decir, traduce *ars* como *artificio*, y con ello, en mi humilde opinión, y con toda mi admiración para este gran ingeniero, distorsiona el significado de la frase.

La técnica, para un romano, tenía entonces una categoría propia y distinta de concepto de arte actual. Si se tradujese *ars* como *técnica*, asociándolo a la raíz griega *techne* en lugar de a la latina *ars*, la traducción creo que sería más fiel al original: "*técnica medienate la cual la materia se vence a sí misma*". Y esta forma de ver las cosas va contra los actuales paradigmas. La *técnica* es hoy día solo un medio, y nunca podría, por si mismo, alcanzar la categoría de *arte*.

Desde una universidad tan influyente como Princeton, el ingeniero y profesor David P. Billington acuñó (METER REFERENCIAS DE LOS PRIMEROS LIBROS... PARA SITUAR FECHA ADEMÁS) lo que para él era un nuevo concepto: el *Structural Art*. Se apoyaba en el trabajo de autores como Maillart, Isler, Candela ... para tratar de demostrar que había un grupo de obras de arquitectura e ingeniería, que merecían el apelativo de obras de arte, en las que la estructura era la protagonista. Es decir, era el manejo de la estructura lo que les permitía alcanzar tal honor. Según él, este suponía que el diseño de estructuras era una disciplina autónoma, no dependiente de la arquitectura.

El *Panteon* de Roma, o el *Doumo* de Florencia son para todo mundo obras de arte, y la componente structural es fortísima. En su momento supusieron retos estructurales no menores que los grandes puentes en el siglo XIX ¿Por qué entones se necesitaba acuñar ese nuevo término?

EIQUI

Some considerations on the term *art*

L. Shiner Shiner, 2001 shows in an essay how the current meaning of the word *art* is relatively new. In fact, this concept did not exist in the Greco-Roman world. The Greek word *techne* is equivalent to the Latin *ars*, and both were associated with expertise in many fields, including manual work. At the time there was no such category as *fine arts* separate from the rest.

When Carlos Fernández Casado studied the Roman bridge at Alcántara, he emphasised one of the phrases in the inscription of the votive temple which stands at one end of the bridge: *ars ubi materia vincitur ipsa sua*, which translates as *art by means of which material overcomes itself* , which is without doubt one of the most beautiful definitions of stone arches. He therefore translates *ars* as *art*, which, in my humble opinion and in spite of all my admiration for a great engineer, I believe distorts the meaning of the phrase.

Technique for a Roman referred to its own category which differed from the current concept of art. If *ars* is translated as *technique*, associating it with the Greek root *techne* instead of the Latin *ars*, I believe the translation would be closer to the original: *technique by means of which materials overcomes itself* . This way of looking at things goes against current paradigms. *Technique* is now simply a means, and it could never alone attain the category of *arte*.

From a university as influential as Princeton, the engineer and professor David P. Billington (METER REFERENCIAS DE LOS PRIMEROS LIBROS... PARA SITUAR FECHA ADEMÁS) coined what he considered to be a new concept: *Structural Art*. He based himself on the work of authors such as Maillart, Isler and Candela ... to try to show that some works of architecture or engineering deserve to be described as works of art in which structure is the protagonist. I.e., they attain this status due to how structure is handled. He said that this assumes that structural design is an independent discipline that is not subsumed under architecture.

Everybody considers the Roman *Pantheon* or the *Doumo* in Florence to be works of art, and they have an extremely important structural component. When they were built they set structural challenges no less important than those faced by the great bridges of the 19th century. So why then did this new term have to be coined?

EIQUI

En mi opinión, el concepto *Structural Art* es uno de los paradigmas contemporáneos asumidos por la Ingeniería. Y como trataré de demostrar, es un paradigma que ha sido, en cieta medida, dañino para esa misma Ingeniería que lo adoptó. El problema es que ha puesto el foco exclusivamente en la estructura, perdiendo de vista el verdadero objeto final de la obra, que nunca es hacer una estructura sino mucho más. No hacemos estructuras, la estructura es un medio más, de entre otros muchos, para conseguir objetos que sirven al hormbre. El concepto *Structural Art* ha contribuido mucho a fomentar el manierismo más que a la obra genuina.

Nervi usó el el término *Structural Architecture*, Carlos Fernández Casado se refería a *la arquitectura del ingeniero* y Yasmin Sabina Khan, la hija de Fazlur Khan, se refiere a *Engineering Architecture* (Khan, 2004).

El análisis de *paradigmas* y *paradojas*

Recordemos el significado de los términos *paradigma* y *paradoja* de acuerdo con la Real Academia Española (RAE):

paradigma: teoría o conjunto de teorías cuyo núcleo central se acepta sin cuestionar y que suministra la base y modelo para resolver problemas y avanzar en el conocimiento. Por ejemplo: *el paradigma newtoniano*.

paradoja: hecho o expresión aparentemente contrarios a la lógica.

Thomas S. Kuhn ha mostrado que cada etapa del pensamiento científico tiene su conjunto de paradigmas. Cada revolución científica arranca de la reconstrucción de dichos paradigmas (Kuhn, 1970).

Una consecuencia lógica de ello es que sea muy difícil, en cada período, que la comunidad científica acepte planteamientos que no vayan en la línea predominante; es decir, acordes a los paradigmas vigentes. Un ejemplo muy ilustrativo: muchos de los primeros artículos sobre *Elementos Finitos* fueron rechazados por los revisores, algo que parece increible hoy día, y que demuestra las tesis de Kuhn.

Aunque el cuerpo teórico existente en torno al *diseño conceptual de estructuras* no alcanza como conjunto, al menos hoy por hoy, una categoría científica, la recopilación y análisis de los paradigmas de las diferentes etapas me ha parecido un método robusto para acercarme a este problema de forma bastante objetiva.

I believe the concept of *Structural Art* to be one of the contemporary paradigms accepted by Engineering. And as I will try to show, this paradigm has been negative to a certain extent for the very Engineering that adopted it. The problem is that it centres exclusively on structure and ignores the final aim of a work, which is always far more than simply creating a structure. We do not build structures, as structure is just one more means to the end of constructing objects that men can use. The concept of *Structural Art* has encouraged mannerism rather than the creation of genuine works.

Nervi used the term *Structural Architecture*. Carlos Fernández Casado referred to *engineer's architecture* . Yasmin Sabina Khan, Fazlur Khan's daughter, refers to *Engineering Architecture* (Khan, 2004).

Analysis of *paradigms* and *paradoxes*

According to the Real Academia Española (RAE)the meanings of the terms *paradigm* and *paradox* are:

paradigm: a theory or set of theories the core of which is accepted unquestioningly, and which supplies the basis and model for resolving problems and advancing knowledge. E.g., *The Newtonian paradigm*.

paradox: a fact or expression that is apparently contrary to logic.

Thomas S. Kuhn Kuhn, 1970 has shown that each stage of scientific knowledge contains its own set of paradigms. Each scientific revolution commences with the reconstruction of the said paradigms.

A logical consequence of this is that during each stage it is very hard for the scientific community to accept theories that go against the prevailing line; i.e., that are contrary to the current paradigms. A very illustrative example of this is that many of the first papers on *Finite Elements* were rejected by the revisers, something that seems incredible now and which is an example of Kuhn's thesis.

Although the existing theoretical corpus on *the conceptual design of structures* is not as a whole now a scientific category in itself, collecting and analysing the paradigms from different stages of knowledge seems to me to be a robust way of approaching this problem in a quite objective way.

On the other hand, and according to Goedel's Incompleteness Theorem, it is impossible to prove that something is completely true, and it is only possible to prove that something is false. The search for *paradoxes* can therefore be used to test the solidity of *paradigms*: each paradox may indicate a crack in the theory, which is why they are so interesting. Analysis of *paradigms* and *paradoxes* therefore has a single end: to question the solidity of the ideas clustered around *the conceptual design of structures*.
This is not a mere theoretical exercise. The author's intention is for the text to be used to aid the learning of the Architecture or Engineering students who it is for. This educational factor motivated the text.

Por otra parte, y de acuerdo con el Teorema de Incomplitud de Goedel, es imposible demostrar que algo es totalmente cierto, solo es posible demostrar que es falso. La búsqueda de *paradojas* valdrá entonces para probar la solidez de los *paradigmas*: cada paradoja podría suponer una fisura de la teoría y, de ahí, su enorme interés. El análisis de *paradigmas* y *paradojas* tiene entonces un mismo fin: cuestionarse la solidez de las ideas agrupadas en torno al *diseño conceptual de estructuras*.
No se trata de un mero ejercicio teórico. La intención del autor es que el texto sirva para apoyar el aprendizaje del alumno de Arquitectura o Ingeniería, a quién va destinado. Es esta faceta docente la que ha motivado el texto.

Case Studies

I believe that theoretical thought in this area is impossible without studying constructed works. Projects and works that have not been built are *a priori* less interesting. Works are the important thing, they are what interest us as architects. Theory about their origins will be of interest to us to the degree that it helps us to become better designers. Much of this work is therefore dedicated to *Cases Studies* .
The aim is not to exhaustively study the different types of structures in existence. Rather, the aim is to examine solutions that are brilliant and have their own individual features.

El Estudio de Casos

Personalmente creo que la reflexión teória en este terreno es imposible sin incluir la revisión de la obra construida. La obra proyectada y no construida tiene un interés menor *a priori*. La obra manda, es nuestro objeto de interés como proyectistas. La teoría en torno a su génesis tendrá interés en la medida en que nos ayude a ser mejores diseñadores. Una parte importante de esta obra se dedica por ello al *El Estudio de Casos*.
No se pretende hacer un recopilatorio exhaustivo de los tipos estructurales existentes. Se pretende hacer hincapié en soluciones que representen soluciones brillantes con rasgos propios.

How the book is organised

The following chapters are organised according to the above criteria in the following way.
EIQUI

La organización del libro

Los siguientes capítulos se organizan, de acuerdo con lo anteriormente expuesto, de la siguiente forma.
EIQUI

Conceptual design levers for structures

blessed is the time that is not needed...

Travel **FernandezCabo2014a**

Palancas del diseño conceptual de estructuras

dichoso el tiempo que no necesita...

El viaje Fernández Cabo, 2014

Zeitgeist: the spirit of the age

Zeitgeist: el espíritu de la época

Is it possible to teach structural design?

¿Se puede enseñar el diseño de estructuras?

Synergies: 1+13

Sinergias: 1+13

Atmospheres

Atmósferas

Aprendizaje

PLANTEAMIENTO BÁSICO.

La palabra diseño es polisémica tanto en castellano como en inglés. El término diseño conceptual de estructuras se refiere a conceptos relativos a los procesos iniciales de la generación de las trazas o forma básica de la estructura. En castellano, para lo mismo, se emplea también el término diseño de estructuras, pero de una forma bastante polisémica también, es decir, ambigua. El añadido del vocablo conceptual ha sido fruto de un consenso más o menos reciente dentro del mundo de la ingeniería de estructuras; y con ello las cosas empiezan a clarificarse un poco más, aunque no totalmente.

Se ha usado el término diseño conceptual porque es uno de los más usados en inglés cuando se habla, de forma específica, sobre esos procesos iniciales; aunque lógicamente con diferentes perspectivas. Esto puede ayudar mucho a enmarcar el ámbito de este texto desde el comienzo.

Se habla además de una perspectiva global. El concepto de diseño de estructuras está cada vez más ligado a lo que Billington denominó Structural Art; es decir, el grupo de obras de arquitectura e ingeniería en donde la estructura no solo es la protagonista de la obra sino que la habilidad mostrada por su proyectista hace sus cualidades estéticas, cuando se basan en una lógica estructural y una apropiada dimensión social, permitan denominarlas como obras de arte. Es decir, se reclama la dimensión artística de la ingeniería estructural. Pero se hace de un modo muy restrictivo: se piensa en obras donde la estructura tiene un papel visual y simbólico protagonista.

Recientemente se ha acuñado el término nuevo estructuralismo en la misma línea, pero con un significado menos restrictivo: acota un tipo de estrategia de proyecto en donde la génesis de la forma tiene una fuerte razón de ser estructural (apoyada además en una línea de investigación muy potente). También es muy usado el término morfogénesis, pero en este caso asociado a algoritmos que permitan producir formas estructuralmente eficaces. Ambos términos son paralelos, el primero más ligado a la arquitectura y el segundo más a la ingeniería.

Estos enfoques plantean y analizan el problema desde una sola perspectiva. Es decir, deja fuera de su análisis a un sin fin de obras de arquitectura e ingeniería en donde la estructura no tiene un papel visual y simbólico protagonista; y que además no son un grupo menos, sino al contrario. Si pensamos en el diseño conceptual de estructuras, el enfoque debe englobar al conjunto de las obras, y no a una parte. O para ser más preciso, al conjunto de obras de calidad reconocida. Es decir, se reconoce el hecho de que el objetivo final es producir una obra de calidad, y no necesariamente una obra de calidad en la que la estructura sea la protagonista indiscutible.

Learning

BASIC METHODOLOGY.

The word “design” has multiple meanings in Spanish as well as in English. The term “conceptual design of structures” refers to concepts about the initial processes of generating the lines or basic form of a structure. The same concept is referred to in Spanish by the term “diseño de estructuras” (“structural design”), although this too has multiple meanings, i.e., it is ambiguous. Adding the term “conceptual” was the result of a more or less recent agreement in the world of structural engineering, and thanks to this things are starting to become a little clearer, although not completely so.

The term “conceptual design” is used because it is one of the expressions used most often in English to specifically refer to the initial processes in question, although logically it does so from different viewpoints. This may help a lot in contextualising the field covered by this text from the first.

An overall point of view is also adopted. The concept of structural design is increasingly associated with what Billington termed “Structural Art”; i.e., the group of architectural and engineering works where structure is not only the central characteristic of the work. Here the skill of the designer means that their aesthetic qualities, when they are based on structural logic and a suitable social dimension, allow them to be called works of art. I.e., this emphasises the artistic dimension of structural engineering. But it does so very restrictively, solely including works in which structure plays a central visual and symbolic role.

The term “new structuralism” was recently coined, and although it is along the same line, its meaning is less restrictive: it expresses a type of project strategy in which the genesis of form has a strong structural justification (one that is also supported by a powerful line of research). The term “morphogenesis” is often used, although it is associated with algorithms that make it possible to create structurally effective forms. These terms are parallel, and the first is more closely associated with architecture, while the second is closer to engineering.

These approaches set and analyse problems from a single point of view. They therefore exclude an infinite number of architectural and engineering works from analysis as their structure plays no central visual or symbolic role; such works are in the majority. When we think of the conceptual design of structures, the focus should be on all works, not just a few. Or, to be more precise, the focus should be on all works of recognised quality. This would therefore recognise the fact that the final aim is to produce a high quality work, not necessarily one in which structure is the indisputable protagonist.

Este texto por tanto plantea una serie de reflexiones en torno al diseño conceptual de estructuras, pero intentado recoger la totalidad de los casos. Se trata finalmente de, por un lado, mostrar qué papel, qué ponderación, se otorgó a la estructura en ese proceso de diseño conceptual. Y por otro lado, el análisis se hace a través de numerosos casos con la idea de recoger el mayor número de enfoques que puedan servir de aprendizaje al diseñador novel, sea arquitecto o ingeniero.
Pues finalmente, y esta es una de las premisas básicas del método de trabajo seguido, la obra refleja las decisiones del proyectista sobre la relación entre estructura y el conjunto de la obra. Miremos fundamentalmente a la obra.
Resumen
Introducción
El enfoque clásico y el concepto de tipo.
La nueva ciencia y los nuevos materiales: la aparición rapidísima de nuevos arquetipos.
Anejo I. La génesis del diseño de la estructura según el proyectista.
Anejo II. La enseñanza del diseño de estructuras: métodos.
——— el concepto de tipo... ver prólogo de Moneo en libro Durand.
ver y dibujar: plantillas mentales. Relación con el concepto de tipo, que acaba funcionando, para bien o para mal, como una plantilla
———— BILLINGTON y el structural art
las tres dimensiones del structural art definidas por Billington: científica, social y simbólica, en paralelo a la tríada vitruviana: Firmitas, Utilitas y Venustas. No veo diferencia alguna.
Comentar lo del New Structuralism.
——— RENÉ MOTRO
Motro, R. (2011). Art and Structural Engineering-Art of Structural Engineering. In SEWC 2011 Proceedings (pp. 8-p).
Por un lado comenta influencias del arte en la ingeniería, como la del constructivismo ruso (de Yannis Xenakis en particular) en el Pabellón Philips construido para la Exposición Universal de 1958 en Bruselas. O el caso de Snelson en las Tesegrity.
Por otra parte está la cuestión de la ingeniería estructural como arte, el Structural Art de Billington que él apoya. Pero ahí introduce cuestiones muy interesantes.

1. en la estructura queda reflejada la personalidad del diseñador, idea expuesta ya por Victor Hugo cada forma es de algún modo el resultado visible de una idea invisible.

Thus although this text contains a series of reflections on the conceptual design of structures, it attempts to cover all cases. Its ultimate aim is on the one hand to show the role and weighting assigned to structure in the conceptual design process. And on the other hand, it analyses numerous cases to describe the greater possible number of approaches to aid learning by new designers, whether they be architects or engineers.
Finally, and this is one of the basis premises of the working methodology here, the work reflects the decisions taken by designers on the relationship between structure and a work as a whole. Fundamentally we examine the work.
Summary
Introduction
The classic approach and the concept of type.
Modern science and new materials: the extremely fast emergence of new archetypes.
Appendix I. The genesis of structural design according to the designer.
Appendix II. Teaching structural design: methods.
The concept of type... see the prologue by Moneo in Durand's book.
Seeing and drawing: mental templates. Relationship with the concept of type, which eventually works, for good or evil as a template
———— BILLINGTON and structural art
The three dimensions of structural art defined by Billington: scientific, social and symbolic, parallel to the vitruvian triad: Firmitas, Utilitas and Venustas. I can see no differences at all.
Comment on New Structuralism.
——— RENÉ MOTRO
Motro, R. (2011). Art and Structural Engineering-Art of Structural Engineering. In SEWC 2011 Proceedings (pp. 8-p).
On the one hand remark on how art influences engineering, such as Russian constructivism (Yannis Xenakis in particular) in the Philips Pavilion built for the 1958 Universal Expo in Brussels. Or the case of Snelson in Tesegrity.
On the other hand there is the question of structural engineering as art, Billiington's Structural Art that he supports. But this introduces very interesting questions.

1. the structure reflects the designer's personality, an idea expressed by Victor Hugo, that each form is in some way the visible result of an invisible idea.

2. las herramientas numéricas son cada vez más potentes, pero no van a eliminar el papel del diseñador, ya que no hay una relación biunívoca entre el problema y la solución. O como también comenta, al comienzo del proceso de diseño hay al menos una dimensión simbólica que no tiene relación ni con lo científico ni con lo social (aludiendo a las tres dimensiones del structural art definidas por Billington: científica, social y simbólica)
3. contribución de las ciencias cognitivas en la mejora de la enseñanza en el diseño de estructuras, memoria a largo plazo (knowledge tank, long term memory), que es alimentada por viajes, cultura, educación... Pero ahí se almacenan no solo elementos sino también procesos (trabajo de C Silvestri)
4. por otra parte, comenta como, viendo ejemplos de movimientos creativos como la Bauhaus o el Black Mountain Collage, el trabajo interdisciplinar suele mejorar la creatividad... ver trabajo de arthur koestler-the act of creation.

JÜRG CONZETT
Jürg Conzett, conversación con Mohsen Mostafavi: `https://www.youtube.com/watch?v=2eOe0T6G2IA`
"no solo leer libros... la visita a la obra, el viaje, es crucial"
caso de la ampliación del Zoo de Basilea pasos seguidos en el diseño de la estructura
Structural design
1st find the goal
2nd use all the engineering skills to reach it
3rd check again (el proceso es iterativo)
"concebir un edificio no es muy distinto a concebir un puente". Efectivamente los procesos de gestación son similares, yo creo que además para cualquier disciplina.
La creatividad o la novedad no son algo que aparece a priori, sino que surge del proceso racional (disciplinar) "just happend" eso y la racionalidad del proceso hace de su postura algo totalmente opuesto al formalismo "hay arquitectos cuya capacidad formal es mayor que la que tienen para integrar la estructura al proyecto".
"¿qué espera del arquitecto? (al colaborar)... curiosidad y respeto"
Imitación de naturaleza nunca "I prefer to talk about the real discipline of the structural engineering... forces"
Las rótulas del puente en Aare... expresan además la propia rótula, cosa que no sucede al usar por ejemplo neoprenos y cosas así... la lectura de las cosas es importante... valió para que no tuvieran que meter sintonizadores de masa. En esto coincide con Virlogeux al valorar estructuras como el puente atirantado de Morandi en Venezuela o el Firth of Forth.

2. numerical tools are increasingly powerful, but they will not eliminate the designer's role because there is no single relationship between a problem and its solution. Or as is said, at the start of the design process there is at least one symbolic dimension that has nothing to do with scientific or social matters (alluding to the three dimensions of structural art defined by Billington: scientific, social and symbolic)
3. the contribution of the cognitive sciences to improving teaching of the design of structures and long-term memory (knowledge tank, long-term memory), which is fed by travel, culture and education... But that stores processes as well as elements (C Silvestri's work)
4. on the other hand, to remark that, seeing examples of creative movements such as the Bauhaus or Black Mountain Collage, interdisciplinary work usually improves creativity... see the work by Arthur Koestler-the Act of Creation.

JÜRG CONZETT
Jürg Conzett, conversation with Mohsen Mostafavi: `https://www.youtube.com/watch?v=2eOe0T6G2IA`
"not only reading books, as it is crucial to also visit works and travel"
The case of the expansion of Basil Zoo, the steps followed in the design of the structure
Structural design
1st find the goal
2nd use all the engineering skills to reach it
3rd check again (the process is repetitive)
"Conceiving a building is not very different from conceiving a bridge". Effectively the creative processes are similar, as I think they are for any discipline.
Creativity or novelty are not something that appears a priori, but rather arise from the rational process (discipline) "Just happened", that and the rationality of the process mean that his attitude is completely opposed to formalism "some architects are better at designing than they are in integrating structure in the project".
"What to expect of the architect? (when co–working)... curiosity and respect"
Never an imitation of nature "I prefer to talk about the real discipline of structural engineering... forces"
The ball–and–socket joints of the bridge at Aare... also express the joint in itself, something that does not occur when for example neoprene and things like that are used... how things are read is important... this was enough to make the use of mass synthesisers unnecessary. In this he agrees with Virlogeux, appreciating structures such as the cable-stayed bridge by Morandi in Venezuela or the Firth of Forth.

"I did not study engineering because I was good at maths, but rather studied mathematics to understand how structures work".
MICHEL VIRLOGEUX
JAVIER MANTEROLA
EDUARDO TORROJA
ALEXANDER SARRASIN
Alexandre Sarrasin, structures en béton armé–audace et invention Brühwiler, Eugen; Frey, Pierre Lausanne: PPUR, 2002
From the thesis by Philippe MIVELAZ, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2007
ALEXANDRE SARRASIN (1895-1976) ET L'ESTHÉTIQUE DE L'INGÉNIEUR
Of Branson bridge (1924-1925) near Fully, his first important commission, he wrote that "the elegance of the design is due to its simplicity. The quietness of its lines is fully harmonized with the landscape. Nothing was planned for the decoration. The bridge is the simple realization of a mathematical truth".
This quotation highlights the issue of form for engineers and especially in Sarrasin's works:
"structural mechanics, as the engineer s aesthetic and fundamental relationship with the landscape".
The thesis contains a section on the genesis of graphic statics.
His dams are better than his bridges, where by inclining the plane closing the reservoir he uses the water's own weight to stabilise it, largely reducing the amount of concrete.
BOOKS
KURRER Karl-Eugen, Geschichte der Baustatik, Ernst & Sohn, Berlin, 2003 (édition originale 2002, réédition corrigée). Il s'agit de l'ouvrage le plus complet à notre connaissance retrace la formation et les développements de la statique, dont les principes fondamentaux sont posés au 19e
PAUSER Alfred, Eisenbeton 1850-1950, Idee, Versuch, Bemessung, Realisierung, par rapport à des ouvrages en français, d'offrir un panorama plus complet des divers développements du matériau surtout en Europe centrale.
GUBLER Jacques, Nationalisme et internationalisme dans l'architecture moderne de la Suisse pour l'histoire de l'architecture et du génie civil en Suisse durant les années 1920 et 1930.
BILLINGTON David P., Robert Maillart, Builder, Designer, and Artist plusieurs ouvrages et articles sur Maillart et un essai, The Tower and the Bridge, traitant de du livre de Siegfried Giedion, Space, Time and Architecture, qui consacre un chapitre à l'ingénieur suissel de l'oeuvre de l'ingénieur suisse en Amérique. La biographie de Maillart est une excellente source de renseignement sur l'histoire des ingénieurs civils issus de l'Ecole polytechnique du Valaisan.

"no estudié ingeniería porque se me dieran bien las matemáticas, sino que estudié matemáticas para entender en funcionamiento de las estructuras."
MICHEL VIRLOGEUX
JAVIER MANTEROLA
EDUARDO TORROJA
ALEXANDER SARRASIN
Alexandre Sarrasin, structures en béton armé - audace et invention Brühwiler, Eugen; Frey, Pierre Lausanne: PPUR, 2002
De la tesis de Philippe MIVELAZ, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2007 ALEXANDRE SARRASIN (1895-1976) ET L'ESTHÉTIQUE DE L'INGÉNIEUR
Of the bridge of Branson (1924-1925) near Fullly, his first important comisión, he wrote that "the elegante of the design is due to its simplicity. The quietness of its lines is fully harmonized with the landscape. Nothing was planned for the decoration. The bridge is the simple realization of a mathematical truth." This quotation highlights the issue of form for engineers and especially in Sarrasin's works:
structural mechanics, as the engineer's aesthetic's fundamental the relation with the landscape.
La tesis tiene un apartado sobre la génesis de la estática gráfica.
Mejor que sus puentes son sus presas, donde al inclinar el plano de cierre de la presa usa el propio peso del agua para estabilizarla, reduciendo el volumen de hormigón en gran medida.
LIBROS
KURRER Karl-Eugen, Geschichte der Baustatik, Ernst & Sohn, Berlin, 2003 (édition originale 2002, réédition corrigée). Il s'agit de l'ouvrage le plus complet à notre connaissance retrace la formation et les développements de la statique, dont les principes fondamentaux sont posés au 19e
PAUSER Alfred, Eisenbeton 1850-1950, Idee, Versuch, Bemessung, Realisierung, par rapport à des ouvrages en français, d'offrir un panorama plus complet des divers développements du matériau surtout en Europe centrale.
GUBLER Jacques, Nationalisme et internationalisme dans l'architecture moderne de la Suisse pour l'histoire de l'architecture et du génie civil en Suisse durant les années 1920 et 1930.
BILLINGTON David P., Robert Maillart, Builder, Designer, and Artist plusieurs ouvrages et articles sur Maillart et un essai, The Tower and the Bridge, traitant de du livre de Siegfried Giedion, Space, Time and Architecture, qui consacre un chapitre à l'ingénieur suisse de l'oeuvre de l'ingénieur suisse en Amérique. La biographie de Maillart est une excellente source de renseignement sur l'histoire des ingénieurs civils issus de l'Ecole polytechnique du Valaisan.

Alexandre Sarrasin, structures en béton armé, audace & invention, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2002. Le catalogue de l'exposition de 2002 est le seul ouvrage monographique consacré à Alexandre Sarrasin à ce jour.
CULMANN Karl, Der Bau der hölzernen Brücken in den Vereinigten Staaten von Nordamerika, réim- pression du livre de 1851, Werner Verlag, Düsseldorf, 1970.
Conceptual design of structures: proceedings of the International Symposium, University of Stuttgart, October 7-11, 1996,Stuttgart/Germany. University of Stuttgart/IASS/IABSE. Editor: Instituf für Konstruktion und Entwurf II. 1996. 2 v.
JÖRG SCHLAICH
J. Schlaigh. Can conceptual design be taught? The Structural Engineer, Vol. 70, N-9. May 1992, p. 171-172.
Comenta como el estudiante de ingeniería, al comenzar a trabajar con la herramienta matemática, deja de pensar, al menos, durante muchos años, en términos intuitivos que sí poseía antes de comenzar sus estudios. Solo después de una digestión que dura años el ingeniero, y no todos, consiguen recuperar ese conocimiento intuitivo, ahora más profundo debido a poseer la herramienta científica.
En Stuttgart plantean, específicamente orientado a mejorar el conceptual design, curso o seminarios dirigidos por profesores y/o profesionales con experiencia en proyecto, y en donde se propone al alumno un ejercicio de diseño más o menos estándar. Primero realizan sketchs muy básicos, sin cerrar el tipo de material. En una segunda fase se decantan por uno y avanzar en su definición, pero ni siquiera en esa fase debe realizar el análisis de la estructura. Generalmente hacen alguna maqueta y se trata de desarrollar un esquema básico válido que pudieran enseñar a un cliente para convencerles de la bondad de la obra. Es decir, se subraya que el análisis no es crucial, en general, para poder proponer una estructura viable de calidad. Aunque hay algo de trampa en ello porque el trabajo se hace asesorado por los profesores, que tienen una experiencia y base científica mayor.
En ocasiones juntaron estudiantes de ingeniería y arquitectura a trabajar juntos. No salía muy bien porque el estudiante de arquitectura tiende a hacer cosas muy complejas y el de ingeniería todavía no tiene capacidad para resolver esas cosas.
ALAN HOLGATE
Holgate, A: "Structural design as an academic discipline: a discussion paper", Structural Engineering Review, 3, September 1991

Alexandre Sarrasin, structures en béton armé, audace & invention, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2002. Le catalogue de l'exposition de 2002 est le seul ouvrage monographique consacré à Alexandre Sarrasin à ce jour.
CULMANN Karl, Der Bau der hölzernen Brücken in den Vereinigten Staaten von Nordamerika, réim- pression du livre de 1851, Werner Verlag, Düsseldorf, 1970.
Conceptual design of structures: proceedings of the International Symposium, University of Stuttgart, October 7-11, 1996, Stuttgart/Germany. University of Stuttgart/IASS/IABSE. Editor: Institut für Konstruktion und Entwurf II. 1996. 2 v.
JÖRG SCHLAICH
J. Schlaigh. Can conceptual design be taught? The Structural Engineer, Vol. 70, N-9. May 1992, p. 171-172.
He remarks how engineering students, when they start to use mathematical tools, cease to think intuitively for a good many years in the way that they did before they started studying. It is only after a digestion lasting years that some engineers are able to recover this intuitive knowledge, now deeper thanks to their use of the scientific tool.
In Stuttgart they set courses or seminars by professors and/or professionals experienced in projects with the specific aim of improving conceptual design. These set students a more or less standard exercise in design. Firstly they draw very basic sketches, without specifying the type of material. In a second phase they decide on the material to be used and progress in defining it, although not even in this phase do they undertake structural analysis. They usually create a model and try to develop a valid basic scheme that they could show to a client to convince them of the benefits of the work. This therefore underlines the fact that analysis is not usually crucial in proposing a viable high quality structure. However, there is a trick here as they work advised by their professors, who have more experience and a stronger scientific basis.
Sometimes engineering and architecture students worked together. This did not usually give very good results, as architecture students tend to do very complicated things while engineering students have yet to develop the capacity to resolve such things.
ALAN HOLGATE
Holgate, A: "Structural design as an academic discipline: a discussion paper", Structural Engineering Review, 3, September 1991.

Learning

"...little can be done by telling someone how to design". Cowan (1980) Harris et al., 1981

EIQUI check the quote
If I had followed Cowan's advice I would not have written this book. But I believe that he is partially right. We tend to talk about *teaching* instead of *learning*. In the first case the burden of proof seems to lie with the person doing the teaching, while in the second case it lies with the person who is learning. I prefer the second case, as it presupposes and active attitude that seeks to learn. And it is that you only learn when you want to, and you only learn in depth about what you love.
EIQUI look for a reference to a book on the subject
Getting to know works and authors
M. Virlogeux Virlogeux, 2002 mentions a good number of notable names in engineering.
Billington Billington, 1996

Atmospheres

Peter Zumthor headed one of his talks with the word *atmospheres* Zumthor, 2006. I think that he is one of the best architects of recent decades. Visiting his works is always very exciting, and the reality is better than any description, which is something that doesn't happen very often.
In this text he reminds us of something which architects seem to have forgotten: the final purpose of a work of architecture is to create a suitable setting for the life within it, an atmosphere. Many factors contribute to this. As Brigitte Labs-Ehlert remarks in her prologue to this workZumthor, 2006, pag.7, "*For Peter Zumthor, atmosphere is an aesthetic category*".

Contaminations

Architecture and Engineering have a cultural dimension that means they cannot take place independently of other human cultural activities. "Contaminations" between disciplines are therefore as logical as they are inevitable. We will offer some examples.
"*At the beginning of the process there is at least one symbolic choice that is not related to scientific or social dimensions*" Motro, 2011, pag.66
Schuchov belonged to constructivism Motro, 2011, pag.??

Aprendizaje

"...little can be done by setting someone how to design". Cowan (1980) Harris et al., 1981

EIQUI revisar la cita
si hubiera seguido los consejos de Cowan no habría escrito este libro. Pero creo que tiena una parte de razón. Solemos hablar de *enseñanza* en lugar de *aprendizaje*. En el primer caso la carga de la prueba parece estar en el que enseña, mientras que en segundo está en el que aprende. Prefiero lo segundo, porque supone una actitud activa del que itenta aprender. Y es que solo se aprende cuando se quiere, y solo se aprende en profundidad lo que se ama.
EIQUI buscar referencia libro del tema
Conocer obras y autores
M. Virlogeux Virlogeux, 2002 recorre un buen número de nombres notables de la ingeníería.
Billington Billington, 1996

Atmosferas

Peter Zumthor tituló una de sus conferencias con la cabecera de *atmósferas* Zumthor, 2006. En mi opinión, es uno de los mejores arquitectos de las últimas décadas. Visitar sus obras supone siempre una gran emoción, y la realidad supera al papel, cosa que muy a menudo no sucede.
Creo que en este texto nos recuerda algo que parecía olvidado por el arquitecto: el fin último de una obra de arquitectura es crear un entorno adecuado para la vida que dentro se desarrolla, una atmósfera. Son muchos los factores que a ello contribuyen. Como comenta en el prólogo de esta obra Brigitte Labs-Ehlert Zumthor, 2006, pag.7, "*For Peter Zumthor, atmosphere is an aesthetic category*".

Contaminaciones

Arquitectura e Ingeniería tienen una dimensión cultural que hace que no puedan desarrollarse de manera autónoma a las restantes manifistaciones cualturales del ser humano. Las "contaminaciones" entre disciplinas son por ello tan lógicas como inevitables. Mencionaremos algunos ejemplos.
"*At the beginning of the process there is at least one symbolic choice that is not related to scientific or social dimensions*" Motro, 2011, pag.66
Schuchov perteneció al constructivismo Motro, 2011, pag.??

Invariantes

Jürg Conzett, entrevista con Mohsen Mostafavi (YouTube)

1. find the goal
2. use all engineering skills to reach it
3. check again

Tipo

Moneo, prólogo del libro de Durand Durand, 1981 *Compendio de Lecciones de Arquitectura. Parte Gráfica de los Cursos de Arquitectura*

Zeitgeist

El vocablo Alemán *Zeitgeist* ha sido adoptado en otras lenguas. La traducción sería "el espíritu de la época". Haciendo uso de este germanismo se define el concepto, creo, de forma más universal.
En mi opinión, si hay alguna fuerza absolutamente arrolladora en el ámbito del diseño, no solo en estructuras sino también en cualquier otro campo, es justamente este, el *Zeitgeist*.
Cada época necesita su propia expresión formal en todo los ámbitos de la cultura. No se produce igual en todos esos ámbitos, ni es igual de fuerte simpre. Obviamente está ligado a cambios en la forma de ver las cosas. Por otra parte, en una época como la nuestra marcada por una exacerbada individualidad, la necesidad de cambio es mayor, lo que explica lo velocidad a la que se producen hoy estos cambios.
A la Arquitectura se le reconoce una indudable componente cultural, y es más normal que cualquiera asuma ese impacto temporal en su forma. Uno podría pensar que la Ingeniería Civil, apoyada enormemente en *la razón*, se debería ver menos afectada por las modas. La realidad no es así, y menos hoy en día. El *Zeitgeist* impone su ley.
El conflicto se puede producir en ámbitos en los que la forma existente es la solución a un problema, y no solo la expresión de una época. Dichosos los tiempos en los que las circunstancias facilitan esos cambios formales, ya que el conflicto es entonces mínimo. Pareciese que todo se ha hecho por una lógica aplastante, cuando la realidad es que el cambio formal se hubiera producido de cualquier manera. Eso sucedió en el *Movimiento Moderno*, cuando los cambios tecnológicos y científicos demandaban un cambio formal en la Arquitectura. No en vano fue la Ingeniería la que influyó en la Arquitectura, y no al revés.

Invariants

Jürg Conzett, interview with Mohsen Mostafavi (YouTube)

1. find the goal
2. use all engineering skills to reach it
3. check again

Tipo

Moneo, prologue of Durand's book Durand, 1981 *Compendium of Architecture Lessons. The graphical part of Architecture Courses*

Zeitgeist

The German word *Zeitgeist* has been adopted in other languages, and would be translated as the "spirit of the age". It is more universal to use the German term.
In my opinion, if any force is completely unstoppable in the world of design, and not only in structures but also in any other field, it is this one, *Zeitgeist*.
Each age requires its own formal expression in all areas of culture. This does not occur equally in all fields, nor is it always equally strong. It is clearly linked to changes in how we see things. On the other hand, in a time like ours which is marked by exacerbated individuality, there is more need for change, and this explains the speed at which changes occur.
Architecture is known to have a definite cultural component, and it is normal for everyone to accept this temporal impact on design. You may think that Civil Engineering, which is very much based on *reason*, must be less affected by fashions. But this is not the case, and even less so nowadays. The *Zeitgeist* rules.
Conflict may arise in areas in which the existing form is the solution to a problem, and not solely the expression of a certain time. Times when circumstances favour these design changes are fortunate, as then conflict is minimum. Although it may seem that everything has been done on the basis of absolute logic, the truth is that changes in design would have arisen anyway. This happened in the *Modern Movement*, when technological and scientific changes led to the demand for a change in Architectural design. It was not in vain that Engineering influenced Architecture and not the other way around.

For Borgart and Kocaturk Borgart and Kocaturk, 2007, *free form* would largely define the *Zeitgeist* in the field of structure.
To see the tremendous power of the *Zeitgeist* in our times, even over relatively short periods of time, nothing makes this clearer that seeing how the works of prestigious authors have evolved over recent decades.
Another reason that explains the high speed of change in current design is linked to the iconic power that singular architecture may achieve. This has always been so. But with the modern mass media, the diffusion and impact of singular works is almost instantaneous. And every city, region and country... has competed to produce its own icons. Some people have termed this the "Bilbao effect", although I believe that it all started with Sydney Opera House.
Currently, to win a competition for a singular work you have to propose a project that has a design which is not only appealing but also, as far as is possible, is a novelty. This novelty is often not based on any rational consideration. It is mainly about creating an object which looks is different from others.
This goes far beyond the changes imposed in the past by the *Zeitgeist*. Right now, the changes in design arise for largely unhealthy reasons.

Para Borgart y Kocaturk, la *forma libre* definiría, en buena medida, el *Zeitgeist* en el entorno estructural (Borgart y Kocaturk, 2007).
Para reconocer el tremendo poder del *Zeitgeist* en nuestros días, incluso en relativamente cortos períodos de tiempo, nada mejor que ver cómo ha ido evolucionando la obra de autores de indudable prestigio en las últimas décadas.
Otra de las razones que explica la gran velocidad actual del cambio formal está ligada a la componente icónica que puede llegar a tener la arquitectura singular. Esto siempre ha sido así. Pero con los Mass Media actuales, la difusión y el impacto de las obras singulares se produce de forma casi instantánea. Y cada ciudad, región, país... ha competido por producir sus propios iconos. Algo que algunos han llamado "Bilbao effect", y que yo creo que arranca con la Opera de Sydney.
La situación actual es que, para ganar un concurso de obras muy singulares, debes proponer un proyecto formalmente no solo atractivo sino, en la medida de lo posible, formalmente novedoso. En muchas ocasiones, esa novedad no está apoyada en ningún motivo racional. Se trataba principalmente de tener un objeto con una forma distinta a las demás.
Esto va ya mucho mas allá de lo que ha sido, históricamente, el cambio formal impuesto por el *Zeitgeist*. En este momento, el cambio formal tiene ya, creo yo, una parte insana muy importante.

Synergies

Creativity is known to increase when people from different disciplines work together in a coordinated way.
This situation has often arisen in structures. One of the most productive Architect-Engineer pairs was Louis I. Kahn and August E. Komendant Komendant, 1975. Analysing Kahn's work before he started working with Komendant is sufficient to show the influence of the latter.
meter fazlur kahn en el som...y godsmith
This type of co-working is not at all common nowadays, at least in what is known as *starchitecture*.
"*...cross pollination between creative people creates the best condition*" Motro, 2011, pag. ??
Nevertheless, and as M. Virlogeux said Virlogeux, 2002, a leader is needed if a team is to work well.
In works of architecture the leader will be an architect, while in engineering works he must be an engineer.

Sinergias

Es bien conocido que la creación se impulsa cuando se personas de disciplinas dispares se unen, de forma coordinada, para trabajar. En estructuras, esta situación ha sido frecuente. Una de las parejas más fructífera de Arquitecto–Ingeniero fue la de Louis I. Kahn y August E. Komendant. Basta analizar la obra de Kahn antes de su colaboración con Komendant para comprobar la influencia de este último (Komendant, 1975).
meter fazlur kahn en el som...y godsmith
Este tipo de colaboración no es hoy nada frecuente, al menos en lo tocante a la llamada *starchitecture*.
"*...cross popullation between creative people creates the best condition*" Motro, 2011, pag. ??
No obstante, y como creo que bien señala M. Virlogeux Virlogeux, 2002, para que el equipo funcione bien debe haber un lider. En las obras de arquitectura es el arquitecto. En las de ingeniería debe ser el ingeniero.

Figura 3: Taliesin. *Taliesin.*

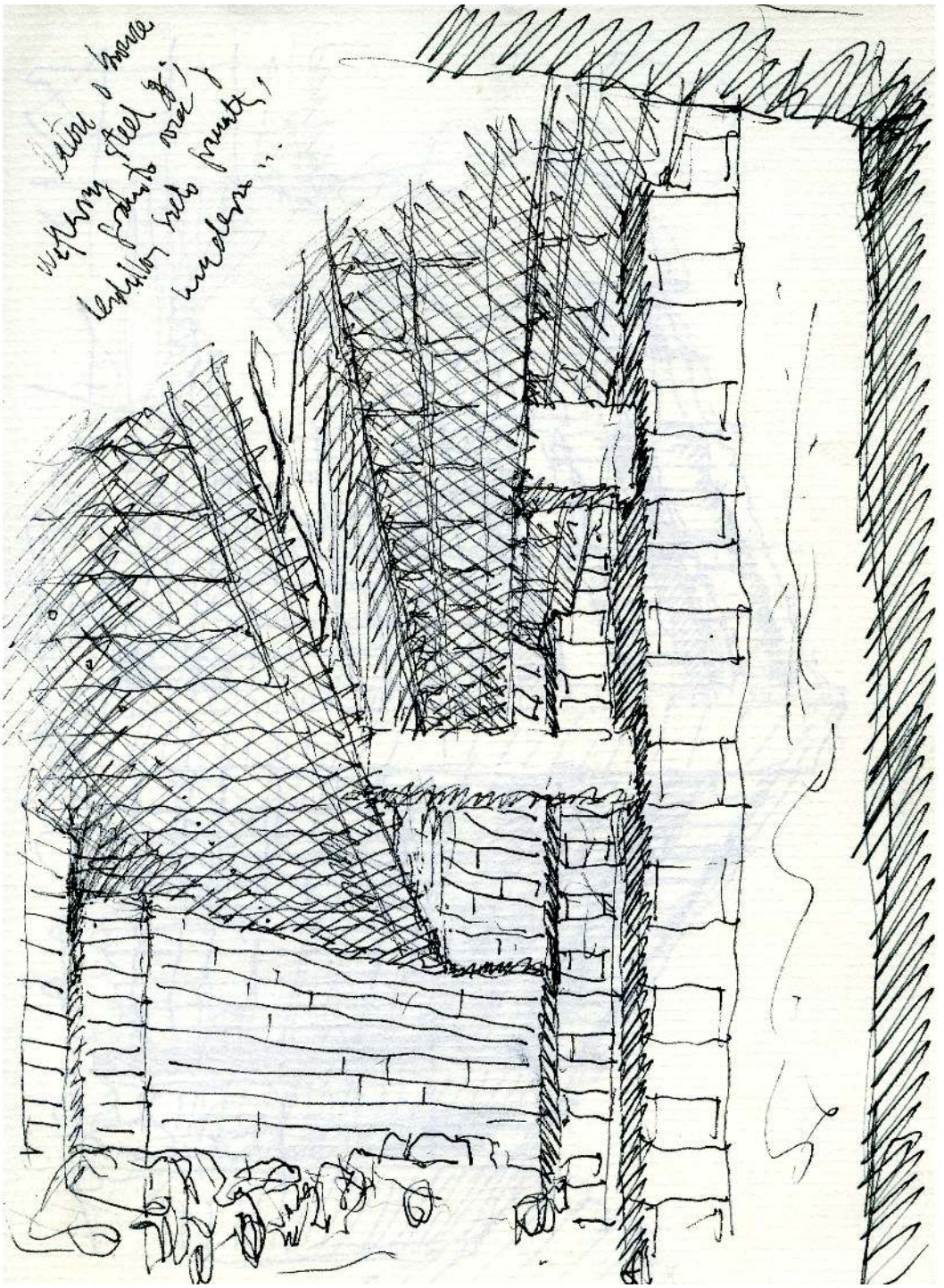


Figura 4: Fundación Ford de Nueva York. *New York Ford Fundation.*

Figura 5: Sagrada Familia, exterior de las escuelas. *Sagrada Familia, exterior view.*

Figura 6: Interior de las escuelas. *Interior view.*

Escuelas Sagrada Familia

Distorting the lintel system: Sagrada Familia Schools.

The Sagrada Familia schools (1908–1909), work of the architect Antoni Gaudí, figures 5 y 6, stand at the foot of the Sagrada Familia Cathedral. Although this is a very humble work in all respects, it is also innovative.
It measures approximately 10 m by 20 m. This project starts with the roof. The central horizontal steel beam, figure 6, supports wooden tie-beams at varying angles along the beam, forming a warped surface. The wooden tie-beams have a span of 5 m. The warping of the roof aids water run-off, together with the gargoyle-like projections of the surface at the troughs.
The facade follows the same geometrical logic and is warped, too. Gaudí uses the concept of a lintel structure in a warped surface. This work is tremendously simple as a construction, in spite of the geometrical complexity of the roof and facade.
Does structure play a role in generating shape in this project? I do not believe that it does. I think that this work stems more from geometry, even though this is expressed in the wooden tie-beams. What happens is that how the structure is used amplifies the initial geometrical idea.
Does a warped geometry necessarily lead to the order of the beam and tie-beams built here? No, as other solutions exist. The double curve would have made it possible to use a shell, even without changing the material, as Eladio Dieste did with his Gaussian vault. With a span of 5 m, even an unlightened panel is feasible. However, the use of a beam and tie–beams, as is the case here, is not only the simplest form of construction but also explains the genesis of the geometry, which is of great value.

Distorsionando el sistema adintelado: Escuelas de la Sagrada Familia.

Las Escuelas de la Sagrada Familia (1908-1909), obra del arquitecto Antoni Gaudí, figuras 5 y 6, se encuentran al pie de la Sagrada Familia. Se trata de una obra muy humilde en todos los sentidos y, al mismo tiempo, innovadora.
Tiene unas dimensiones de aproximadamente 10 m por 20 m. La génesis del proyecto arranca de la cubierta. Sobre la viga central horizontal de acero, figura 6, se apoyan viguetas de madera pero con pendientes variables a lo largo de la viga, de forma que se genera una superficie alabeada. Las viguetas de madera tienen una luz de 5 m. El alabeo de la cubierta permite una fácil evacuación de agua, favorecida por esa especie de gárgolas que crea prolongado el paño de la cubierta en los valles.
La fachada, siguiendo esa misma lógica geométrica, también se alabea. Gaudí usa el concepto de estructura adintelada en una superficie alabeada. La obra es tremendamente sencilla en su construcción, a pesar de la complejidad geométrica de los paños de cerramiento de cubierta y fachada.
¿Tiene la estructura un papel generador de la forma en el proyecto? Creo que no. Creo que es más bien la geometría, aunque vinculada con las viguetas de madera, el germen de la obra. Lo que sí sucede es que la forma en que se usa la estructura amplifica esa primera idea geométrica.
¿La geometría alabeada conduce necesariamente al orden de viga y viguetas construido aquí? No, existen otras soluciones. La doble curvatura permitiría haber apostado por una lámina, incluso sin cambiar de material, como hizo Eladio Dieste, armando la fábrica de ladrillo. Con una luz de 5 m, hasta la placa sin aligerar es viable. Pero el uso de viga y viguetas, tal y como se ha hecho, no sólo es la forma más sencilla de hacer las cosas, sino que además explica la génesis de la geometría, algo de gran valor.

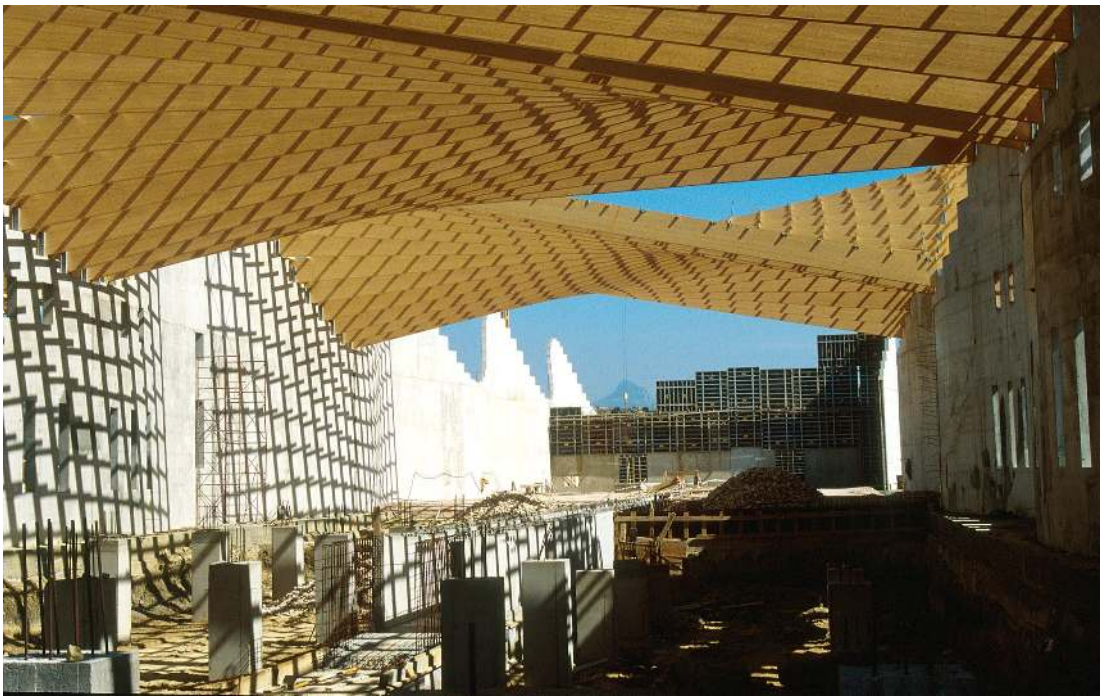


Figura 7: Bodegas Ysios en fase de construcción. *Ysios winery under construction.*

Figura 8: Unidad de montaje de la estructura de madera de cubierta. *Erection unit of roof structural wood under construction.*

Bodegas Ysios

Ysios Winery:
Distorting the lintel system.

Figure 7 shows a building for Bodegas Ysios (2001), located in Laguardia, La Rioja, during its construction. It is by the architect Santiago Calatrava.
It is almost impossible not to notice the similarities between this work and another far older one, the Sagrada Familia Schools by Antoni Gaudí figures 5 and 6. In this case the spans between the perimeter walls are longer, at about 30.0 m, and they are crossed by laminated wood beams supported at both ends. The wooden tie-beams of the Sagrada Familia Schools are 5 m long.
Apart from the span, the differences here lie above all in the way the roof is covered. Calatrava chooses to step this covering, fitting it step by step to the lower beams. This creates a great many joints and there were problems with water-proofing the building because of this. Although this was a technical problem that could be resolved, the route taken here was very complex.
The figure 8 shows the roof structure erection unit, composed of three beams, the tie–beams and a provisional steel tie system. The galvanized steel housings on the side of the beams show how geometrically complex the roof covering is.
The overall concept of this work is the same as that of the Sagrada Familia Schools. Nevertheless, the way the different elements are used is very different. Gaudí's work is far more humble: this is shown, for example, by his use of brick or the decision to create an intermediate line of support using a metal structure, which could easily have been avoided. In fact, this winery is one of a set of works by internationally famous architects. These works were created to become self-advertising icons. It is clear that Gaudí's aim in his work is very far from any such criterion. This difference in purpose is clear in both works, and this means that the initial similarities between them eventually become quite ill-defined.

Bodegas Ysios:
Distorsionando el sistema adintelado.

La figura 7 muestra una nave para las Bodegas Ysios (2001), situada en Laguardia, La Rioja, durante su proceso de construcción, obra del arquitecto Santiago Calatrava. Es casi imposible no encontrar las similitudes de esta obra con la anterior, mucho más antigua, las Escuelas de la Sagrada Familia de Antoni Gaudí, figuras 5 y 6. En este caso, las luces entre los muros perimetrales son mayores, de unos 30 m, que se salvan mediante vigas biapoyadas de canto de madera laminada. Recordemos que las viguetas de madera de las Escuelas de la Sagrada Familia tienen 5 m.
Las diferencias, luces aparte, se encuentran sobre todo en la forma de resolver el cerramiento de cubierta. Calatrava opta por escalonar ese cerramiento, adaptándose paso a paso a las vigas inferiores. Eso creó multitud de juntas. La obra dio problemas de impermeabilización por dicho motivo. Al final son problemas técnicos que se pueden resolver, pero se opta por un camino muy complejo.
La figura 8 muestra la unidad de montaje de la estructura de cubierta, formada por tres vigas, las viguetas y un sistema de atado provisional de acero. Las cazoletas de acero galvanizado que aparecen en el lateral de las vigas indican la complejidad geométrica del cerramiento de cubierta.
El concepto general de la obra es el mismo que el de las Escuelas de la Sagrada Familia. Sin embargo, el manejo de los distintos elementos es bien distinto. La obra de Gaudí es mucho más humilde, lo que se refleja, por ejemplo, en el uso del ladrillo o en la decisión de crear una línea de apoyo intermedio, con estructura metálica, que podría haberse evitado con facilidad. Por el contrario, y como es bien conocido, esta bodega pertenece a un conjunto de obras hechas por arquitectos "estrella" a nivel internacional. Se trata, por tanto, de obras con vocación de ser iconos publicitarios. Es claro que la obra de Gaudí está muy lejos de esos parámetros de partida. Esa distinta vocación queda patente en ambas obras, y hace que las similitudes iniciales queden, finalmente, bastante borrosas.

Figura 9: Detalle de base de soporte de hormigón. *Detail of concrete supports base.*

Centro de Estudiantes en Estocolmo

Distorting the lintel system:
Ralph Erskine

Ralph Erskine built several magnificent buildings in the Technical University, Stockholm, during the 1980s and 1990s. One of these is the Students' Centre, Figures 10 to 12.
The way he handles structure here and its relationship with the overall shape connect with what Gaudí did in the Sagrada Familia Schools. The project has a very regular floor plan, based on a regular pattern. But at the edges the lintel walls rise and fall, creating a facade that we could call expressionist. This movement is not visible inside, where the regular pattern is shown intact. Everything is far simpler than it may seem to be, and the construction and structure interlink in a highly consistent way. This is basically quite a classical work.
There are some fine details on the exterior, figures 9 and 13, such as the concrete base of the supports, which are almost sculptures. Or the proud way the metal brackets are displayed on the wooden structure, as although there is nothing special about them, they are shown so honestly and simply that they almost become design details.
It is important to underline, once again, that Erskine's expressionism is linked to the tectonics of the project. This is very different from more recent architectural works, in which the form is designed without taking the construction into account at all or how it relates to the structure. Moreover, this distortion in the regular pattern only arises in the exterior galleries, giving the project a powerful image.

Distorsionando el sistema adintelado:
Ralph Erskine

Ralph Erskine construyó, entre los años 80 y 90 del pasado siglo, dentro de la Universidad Técnica de Estocolmo, varios edificios magníficos. Uno de ellos el *Centro de Estudiantes*, figuras 10 a 12.
El manejo que hace de la estructura, y su relación con la forma global, tiene relación con lo realizado por Gaudí en las Escuelas de la Sagrada Familia. El proyecto tiene una planta muy regular, con una trama como base. Pero en los bordes sube y baja esos paños adintelados, produciendo una fachada que podríamos denominar como expresionista. En el interior, ese movimiento desaparece y la trama regular se muestra intacta. Todo es mucho más sencillo de lo que pudiera parecer, y construcción y estructura se entrelazan con gran coherencia. Es una obra bastante clásica en el fondo.
En el exterior se recrea en algunos detalles, figuras 9 y 13, como la base de hormigón de los soportes, convertidos en casi esculturas. O muestra orgulloso enlaces metálicos de la estructura de madera que nada tienen de especial; pero los muestra con tal honestidad y sencillez que los convierte en detalles casi de diseño.
Es importante resaltar, una vez más, que ese expresionismo de Erskine está ligado a la tectónica del proyecto. En eso hay un salto muy importante respecto a arquitecturas más recientes, en donde la forma se diseña sin pensar en absoluto en la construcción y su relación con la estructura. Además, esa distorsión de la trama se localiza sólo en las galerías externas, dando una poderosa imagen al proyecto.

Figura 10: Plieges en la cubierta.
Folds in the cover.

Figura 11: Vista inferior de las plieges de cubierta.
Inferior view of folds in cover.

Figura 12: Vista general.
General view.

Figura 13: Uniones mediante piezas galvanizadas de los elementos de madera en cubierta. *Galvanised metal brackets on the wooden roof structure.*

Figura 14: MUSAC, vista exterior. *MUSAC, exterior view.*

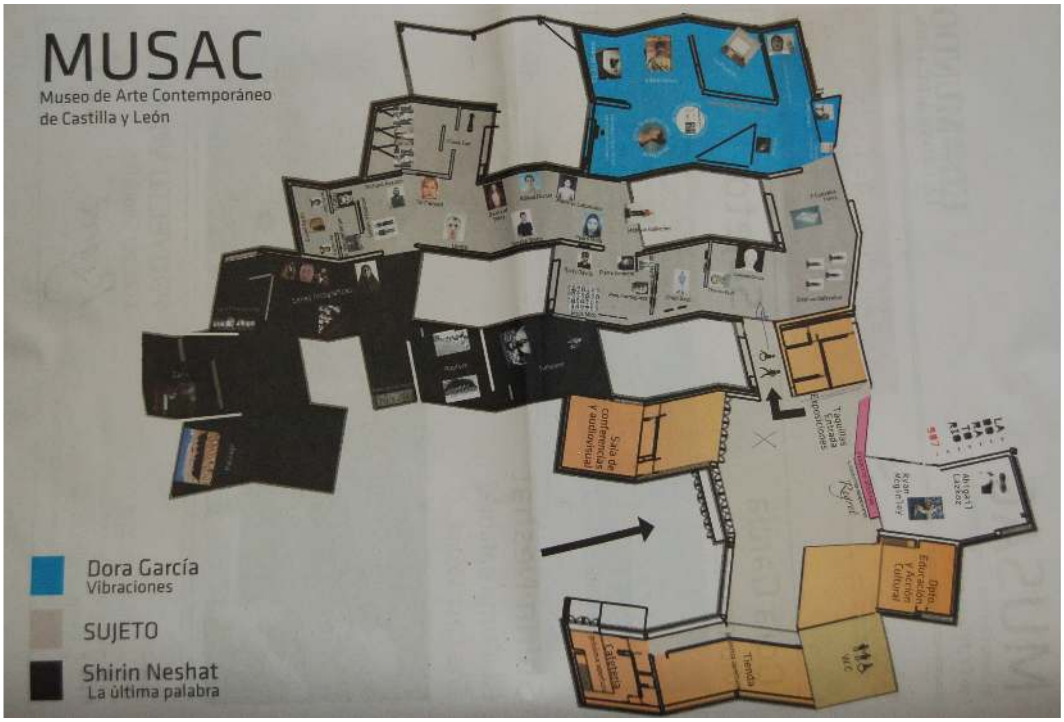


Figura 15: MUSAC, planta baja. *Ground floor plan.*

Distortion and recreation based on a classical use of space.

The Castile and León Museum of Modern Art (2005) is by E. Tuñón and L. M. Mansilla. It is located in León. The brightly coloured exterior, figure 14, is made of glass panels, and it brings to mind the stained glass windows of León Cathedral.
The floor plan is very simple, figure 15, as it is a sum of spaces of equal width, with the particularity that they are not rectangular because the lines are distorted. This movement does not affect the working of the museum at all, while making it highly dynamic. Changes in height add to this dynamic image, and they do not alter the simplicity of the ground plan. Once again we can talk about slight distortions in classical designs.
The structure could not be more logical or simpler: prefabricated "Π"–shaped concrete beams run from wall to wall, with a trussed compression layer, reinforcement for local loads and joint covers. When there is no wall a concrete main beam is added. The structure is visible, and it is a very important part of the interior image. The organisation of the floor plan decides the choice of structure, not vice versa. Once this has been decided, it is very logical and simple to select the type of structure. As the structure is left visible, and given its different heights, either wood or concrete could have been used. The second option is more economical, although I do not believe that this was the reason it was chosen.
As always, a clean project design and a clear idea mean that structural decisions are taken easily and correctly. This is also the order in which decisions are usually taken, although as we shall see, this is not always the case. Expertise in designing the structure improves the whole project.
The choice of coloured glass for the facade is vital for the building as a whole, differentiating and contextualising it. This is a magnificent project.

Distorsión y recreación desde un esquema de crujía clásico.

El Museo de Arte Contemporáneo de Castilla y León (2005) es obra de E. Tuñón y L. M. Mansilla. Está situado en León. El colorido exterior, figura 14, conseguido con paneles de vidrio, recuerda a las vidrieras de la Catedral.
La planta es muy sencilla, figura 15. Consiste en una suma de crujías de la misma anchura, con la particularidad de que no son rectangulares sino que la trama está distorsionada. Este movimiento no perturba en nada el funcionamiento del museo y le imprime un gran dinamismo. Los cambios en la altura ayudan a esa imagen dinámica, y disimulan la sencillez de la planta. De nuevo podemos hablar de ligeras distorsiones de esquemas clásicos.
La estructura no puede ser más lógica y elemental: unas vigas de hormigón prefabricadas en "Π" entre muro y muro, a las que añadir una capa de compresión de atado, refuerzo a cargas locales y tapado de juntas. Cuando no hay muro se añade una jácena, también de hormigón. La estructura se deja vista, y es una parte muy importante de la imagen interior.
La organización en planta define la elección de la estructura, y no al revés. Decidido eso, es muy lógica y sencilla la elección del tipo estructural. Al quedar la estructura vista, con las alturas que hay, se podría haber optado por madera u hormigón. La segunda opción es más económica, aunque no creo que esa haya sido la razón para su elección.
Como sucede siempre, un esquema de proyecto limpio y una idea clara hacen que las decisiones estructurales se tomen con facilidad y acierto. Ese, además, es el orden habitual en la toma de decisiones; aunque, como iremos viendo, no siempre es así. El oficio en el manejo de la estructura hace que esta potencie al conjunto.
La elección de los vidrios coloreados de fachada es una decisión vital en el conjunto, lo diferencia y lo contextualiza. Es un magnífico proyecto.

Figura 16: Sagrada Familia, vista desde cerca de la Torre de Collserola.
The Sagrada Familia, view from close to the Collserola Tower.

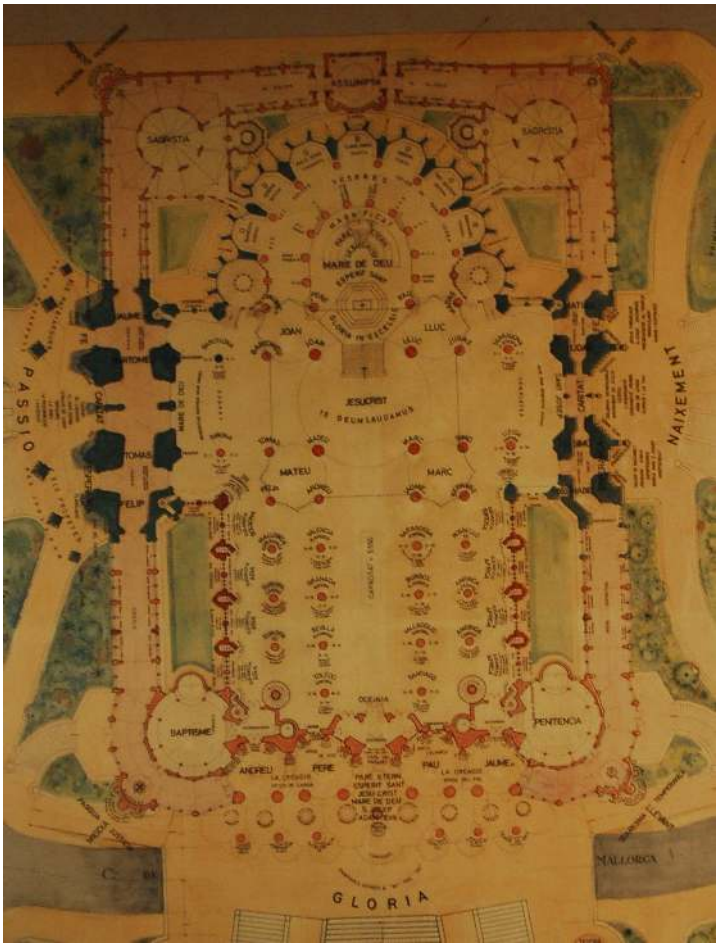


Figura 17: Planta de la Sagrada Familia.
The ground plan of the Sagrada Familia.

La Sagrada Familia

The Sagrada Familia:
resting on gravity to shape forms.

Work on building the Sagrada Familia commenced in 1882 with a neo-Gothic design. One year later, Antoni Gaudí, who was 31 years old, took charge of the project and started to completely rethink it. He recast it more in the form of his eclectic, personal and sometimes atemporal world, which is present in many of his works. This is also an anachronic work; due firstly to its intrinsically neo-Gothic concept, which persists in the ground plan, figure 17, and secondly in the work as a whole, which arises as if the 20th century had never existed. Nevertheless, this is a marvellous work.

Although Gaudí worked on this project until his death in 1926, he only started the work. This has almost miraculously continued to be built, especially in this new century, thanks to the economic contribution of up to three million visitors per year.

The dome will be about 170 m tall. The figure 16 shows the situation of the work in 2004. It will be part of the Barcelona skyline, and as a point of reference the "Four Towers" of Madrid are about 200 m high. I.e., this really is a "skyscraper".

Although Gaudí specified the project, he did not do so for all of its details. Computer assistance has been of key importance in developing it, in terms of its geometry as well as for the analysis and checking of its structure, which can now make use of high-strength reinforced concrete.

The ground plan of this work is neo-Gothic figure 17, although this is used as the basis for a fascinating and novel use of volume, figurea 21.

This volume would not be expected in this ground plan, and of course it is quite unlike the volume of gothic cathedrals.

Gaudí uses physical models as a form-finding tool, figure 23. However, as was pointed out above, computers have played a key role in the final design of the structure.

Although the structure is allowed to take the most suitable form, it is Gaudí who determines the whole volumetric symphony. I.e., although he takes structure and uses it to mould form, I believe that it would be impossible to explain the origin of this work on the basis of its structure. And this even though we are talking about a "skyscraper".

La Sagrada Familia:
apoyándose en la gravedad para perfilar formas.

La Sagrada Familia se comienza en 1882 con diseño neogótico. Un año más tarde, Antoni Gaudí, con 31 años, se hace cargo del proyecto y comienza a replantearlo por completo, llevándolo hacia ese mundo ecléctico, personal y a veces atemporal presente en muchas de sus obras. Es una obra anacrónica; en primer lugar, desde su propia concepción neogótica que perdura en la planta, figura 17, pero también en su conjunto, que se desarrolla como si no hubiera existido el siglo XX. Con todo eso, es una obra maravillosa.

Aunque Gaudí trabaja en este proyecto hasta su muerte en 1926, no hará más que iniciar la obra que, casi milagrosamente, se ha venido construyendo, en especial en este nuevo siglo, gracias la inyección económica de hasta tres millones de visitantes anuales.

El cimborrio tendrá cerca de 170 m de altura. La figura 16 muestra la situación de las obras en 2004. La obra formará parte del *skyline* de Barcelona. Por si sirve de referencia, "las cuatro torres" de Madrid se mueven en torno a los 200 m de altura. Es decir, se está hablando de un "edificio en altura".

El proyecto quedó definido por Gaudí, aunque no con todo detalle. El auxilio de progras de cálculo automático y de dibujo ha sido clave para su desarrollo, tanto para la definición geométrica como para el análisis y comprobación de la propia estructura, donde ahora aparece ya el hormigón armado de alta resistencia.

Como se ha indicado, la planta de la obra es neogótica, figura 17, pero a partir de ahí se desarrolla una volumetría fascinante y novedosa, figura 21.

Se trata de un volumen que no se esperaría de esa planta y que, desde luego, tiene poco que ver con el de las catedrales góticas.

Gaudí usa modelos físicos como herramienta de *formfinding*, figura 23. No obstante, como ya se comentó, el uso de programas de cálculo y de dibujo ha sido clave para el desarrollo final de la estructura.

Se deja que la estructura coja la forma más adecuada, pero es Gaudí quién decide toda esa sinfonía volumétrica. Es decir, se apoya en la estructura, la usa para moldear la forma, pero creo que de ningún modo se puede explicar la génesis de la obra desde la estructura. Y eso que se está hablando de un "edificio en altura".

Figura 18: Maqueta con la sección tipo de la nave.
Model with the cross section.

Figura 19: Vista inferior de la nave central acabada.
Inferior view of the nave.

Figura 20: Sección transversal.
Cross section.

Looking at the interior of the finished work (which still lacks its dome), this shows the use of funicular models with inclined supports, figura 18.
The use of models during the design of this work has to be underlined, figura 22, although state-of-the-art CAD programs have also been used. Computers have not ruled out the use of models at all, and in any work of a certain degree of importance both tools are used. Structure does not generate a work. However, as in other cases, Gaudí uses gravity as a formal tool instead of considering it an obstacle.

Mirando al interior de la obra acabada (todavía sin el cimborrio), se refleja el uso de modelos funiculares, con soportes inclidados, figura 18.
Hay que destacar el empleo de maquetas durante el desarrollo de la obra, figura 22, a pesar de que, al mismo tiempo, se han estado usando los programas de CAD más avanzados. El empleo del cálculo automático y los programas de dibujo no ha eliminado hoy en día a la maqueta en modo alguno. En cualquier obra de cierta entidad se siguen usando ambas herramientas.
La estructura no es generadora de la obra. Pero, como hace en otros casos, Gaudí usa la gravedad como herramienta formal en lugar de como obstáculo.

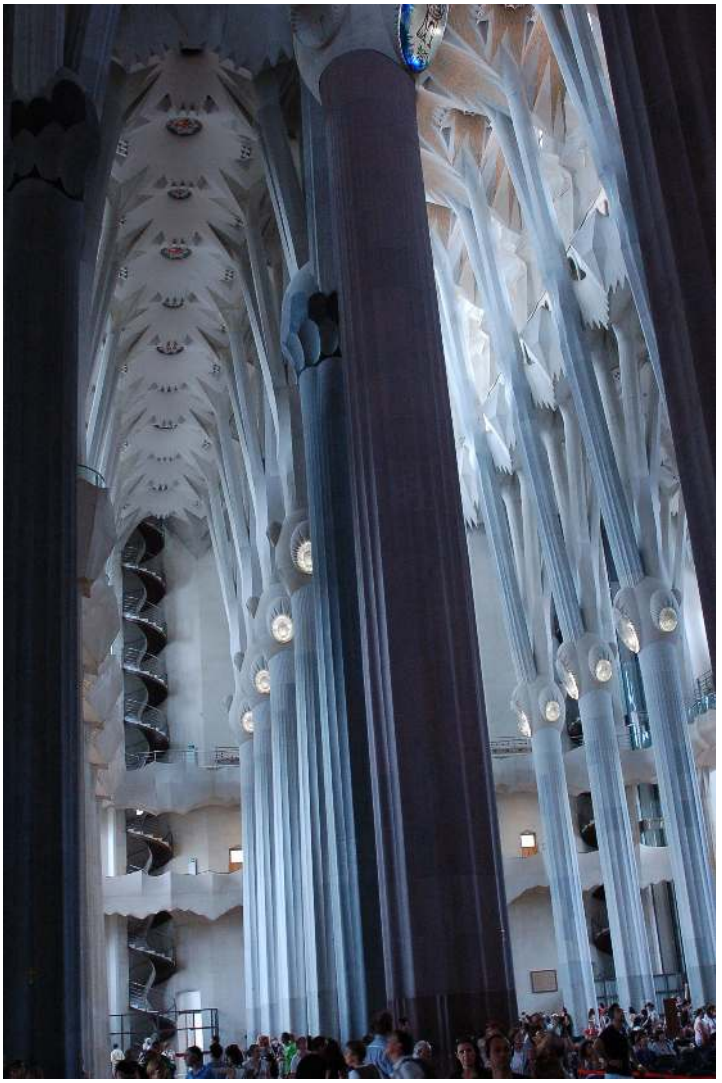


Figura 21: Naves lateral y central.
Side and center nave.

Figura 22: Detalle de los soportes.
Detail of pillars.

Figura 23: Modelo funicular realizado para determinar la inclinación de soportes y torres.
Funicular model for determine the slope of pillars and towers.

Figura 24: Parque Güell, cornisa de la sala hipóstila.
Parque Güell, cornice of the hypostyle hall and sculpture.

Figura 25: Galería semienterrada.
Semi-subterranean gallery.

El Parque Güell

El Parque Güell:
A fantasy world made of trencadís.

Parque Güell (1900-1914) is the work of Antoni Gaudí, with the help of Josep María Jujol. Comparing the work of both of them, and looking at the other projects in which they collaborated (such as Batlló House or La Pedrera), I believe that the dreamlike and more playful spirit here stems from the latter. The spirit which he imbues in this work, which makes widespread use of coloured ceramic fragments (trencadís) can be seen in the details shown in the figure 24. These images, and other similar ones, define this work far more than any structural aspect. But as is usual with Gaudí, he handles the structure masterfully, supporting the whole work and making it even better.

Having said that, two interesting aspects should be mentioned, and these are in fact connected with the structure. The first and best-known of these is the shape of a gallery, the side of which functions as a load-bearing wall figure 25, and where graphical statics are used to obtain a funicular shape inside the said gallery. In this way the wall leans, as do the supports. Once again, Gaudí uses forces to mould shape rather than considering them to be a hindrance.

Another outstanding part in terms of the use of structure is the semi-subterranean hypostyle room figure 27. There is very little room between the columns, which are like an invitation to play hide-and-seek. This separation is clearly not the result of any structural need. In fact, in one area where Gaudi wished for more light, he eliminated a couple of columns without also it seems altering the structural system. And even without those supports, the gaps are small. As is the case in other hypostyle rooms, the diameters of the columns and the spaces between them do not have to be determined at all by structural considerations. And this is definitely an example of that.

El Parque Güell:
un mundo fantástico hecho con trencadís.

El Parque Güell (1900-1914) es obra de Antoni Gaudí. Con él colabora también Josep María Jujol. Comparando la obra de ambos, y cómo es la obra en la que colaboran (como la casa Batlló o La Pedrera), creo que esa vena onírica y más lúdica es introducida por este último. El espíritu que se imprime a la obra, que usa en muchas partes restos de cerámicas de colores (trencadís), se puede apreciar en los detalles que se muestran en la figura 24. Esas imágenes, y similares, definen la obra mucho más que cualquier aspecto estructural. Pero como es habitual en Gaudí, maneja la estructura de forma magistral, apoyando al conjunto, haciéndolo todavía mejor.

A partir de ahí es interesante comentar dos aspectos, ahora sí, relacionados con la estructura. El primero, y más conocido es la forma de una galería cuyo lateral hace a la vez de muro de contención, figura 25, y en donde se usó la estática gráfica para obtener una forma funicular del interior de dicha galería. De este modo, el muro se inclina, al igual que los soportes. Una vez más, Gaudí usa las fuerzas para moldear la forma, y no como un obstáculo.

Otra parte a destacar, en cuanto al uso de la estructura, es la sala hipóstila semienterrada, figura 27. La separación de las columnas es muy pequeña, como para jugar al escondite. Obviamente, esa separación no es fruto de un argumento estructural. De hecho, en alguna zona en la que le interesa ampliar la luz, elimina un par de columnas sin además alterar, aparentemente, el sistema de forjado. Y es que aún eliminando ese soporte son luces pequeñas. Como sucede en otros casos de salas hipóstilas, los diámetros de las columnas y sus separaciones no tienen por qué estar determinadas, en absoluto, por motivos estructurales. Y este, desde luego, es un ejemplo de ello.

Figura 26: Vano doble en la sala hipóstila semienterrada. *Semi-subterranean hypostyle hall.*

Figura 27: Sala hipóstila semienterrada. *Semi-subterranean hypostyle hall.*

Figura 28: Maison de l'Homme, Zürich.
Maison de l'Homme, Zürich.

Figura 29: Detalles del cerramiento.
Facade detail.

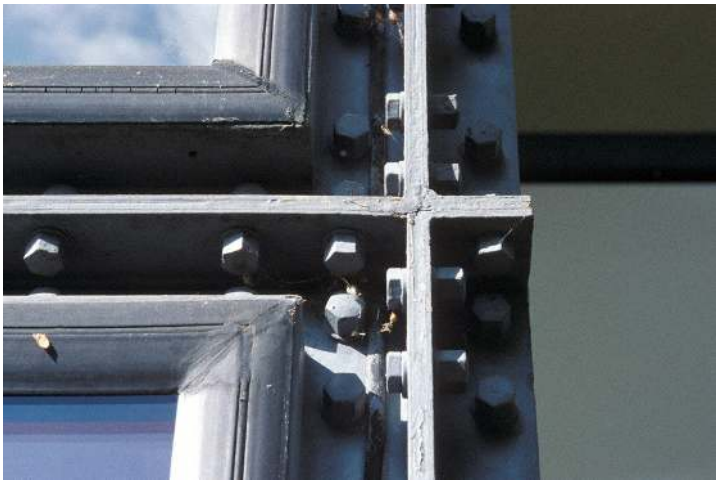


Figura 30: Detalles de la malla metálica que forma el cuerpo principial.
Details of the metal grid that forms the main body.

Maison de l'Homme

Maison de l'Homme:
Two classical elements: the grid and the brise soleil.

The Maison de l'Homme was built in the 1960s close to Lake Zürich figure 28. Le Corbusier never saw it finished. It is a building designed as the synthesis of several arts, and its final purpose was to act as a showcase and exhibition. Its symbolic size is therefore highly important. Its function and intention is similar to that of the modern temporary structures which the Serpentine Gallery in London has been erecting for some years.
It has a modest ground plan: 12 m × 26.3 m. But the cubic grid that makes up the whole body of the work is even smaller, at 2.26 m (using the The Modulor), and it is made of a metal structure figure 29. It seems that Le Corbusier suggested a concrete structure, but his client, the Swiss gallery owner Heidi Weber, convinced him to make it using steel. This change seems to have been a very good idea. This construction is fantastic and very modern. It looks like the structure of a car.
As Oíza said, with heavy irony: "May God help those who modulate". Le Corbusier uses the structural grid in the same way that jazz uses the bass: it holds the composition together. This is a classic use of structure, to which Le Corbusier and other modern-movement architects add the counterpoint.
The roof, at about 9 m high, uses another composition tool that is already classical: the brise soleil. Forms here may have led him to suggest and use single layer constructions, such as a hyperbolic paraboloid. But what he uses, and I believe correctly, is simply a very simple but stylish lintel system, without any supports at the corners.
So Le Corbusier uses structure to compose more than a simple strong building. I believe this to be one of his best works. The fact that the majority of Le Corbusier's works are in reinforced concrete is highly significant. It would surely be worthwhile to analyse this far more closely.
Personally, for example, I cannot imagine the structure of the main body of this work, the 2.26 m grid, made of reinforced concrete. That would change the project completely, and I believe that it would do so for the worse. How important the choice of material is!

Maison de l'Homme:
dos elementos clásicos: la trama y la sobrecubierta.

La *Maison de l'Homme* se construye en los años 60 junto al lago de Zürich, figura 28. Le Corbusier no la verá acabada. Es un edificio diseñado como síntesis de varias artes, y destinado, en definitiva, a la difusión y la exposición. Su dimensión simbólica es, por tanto, muy importante. Su función e intención es algo parecida al de las actuales construcciones provisionales que la Galería Serpentine viene haciendo en Londres desde hace años.
Sus dimensiones en planta son modestas: 12 m × 26,3 m. Pero todavía lo es más la dimensión de la malla cúbica que compone todo el cuerpo principal de la obra, 2,26 m (haciendo uso del *El Modulor*), y que está hecho con estructura metálica, figura 29. Parece ser que Le Corbusier proponía una estructura de hormigón, y su cliente, la galerista suiza Heidi Weber, le convenció para hacerlo con acero. Cambio que parece muy acertado. La construcción es fantástica, muy moderna. Parece la carpintería de un coche.
Como decía Oíza, con mucha ironía: "al que modula Dios le ayuda". Le Corbusier usa la trama estructural como una pieza de jazz usa el bajo. Arma la composición. Es un uso clásico de la estrutura, al que Le Corbusier y otros arquitectos del movimiento moderno añaden el contrapunto.
En la cubierta, a unos 9 m de altura, utiliza otra herramienta ya clásica de composición: el paraguas. Las formas podrían haberle llevado a proponer y ejecutar el uso de láminas, como el paraboloide hiperbólico. Pero lo que hace, creo que con acierto, es simplente un sistema adintelado muy sencillo pero aparente, eliminando los soportes de las esquinas. Es decir, Le Corbusier usa la estructura para componer más que como simple estructura resistente. Creo que es una de sus mejores obras.
El hecho de que la mayoría de la obra de Le Corbusier se haga usando el hormigón armado es algo muy significativo. Seguramente se trata de una cuestión que merecería la pena analizar con mucho más detenimiento. Personalmente, por ejemplo, no me imagino la estructura del cuerpo principal de esta obra, la retícula de 2,26 m de separación, hecha de hormigón armado. El proyecto cambiaría completamente, y creo que para peor. ¡Qué importante es la elección del material!

Figura 31: Villa Saboya, fachada sur.
Villa Savoya, exterior views.

Figura 32: Patio interior desde el salón.
Terrace view from the living room.

Figura 33: Interior del salón.
Living room interior.

La Villa Saboya

The Villa Saboya:
New types of structure that create a new aesthetic.

Villa Savoya (1929), by Le Corbusier, is a manifesto in itself figures 31 to 33. It fulfils the famous five points of his new architecture: it is built on pilotis[a], has a flat garden roof, a free floor plan, a free facade and horizontal windows separated from the structure (fenêtre en longeur).
The facade shows the supports, which form a grid, although the ground plan is less than it looks in elevation figure 31. Le Corbusier used regular supporting grids a lot, in counterpoint with irregularly shaped partitions disconnected from the grid.
The five points are made possible by the high strength of new materials, so that small supports form the vertical bearing element. But moreover, and above all, the aim is to differentiate the building from the classical ground plan and facade. This emphasises the separation between the structure, the walls and partitions.
The flat roof is nothing other than another opposition to the classical style, proposed when the technology to resolve this was still lacking. The same occurs with the pilotis and their wide spacing. I.e., a new technical tool becomes an aesthetic weapon. This has always happened and I believe it will always happen. It is the Zeitgeist. A new technique is used to propose a new aesthetic. But the structure, in this work and other similar ones, is the catalyst rather than the driving force.
This inversion of formal classical aspects creates images which still look very new today, figure 33.
New materials and new types of structure therefore play a crucial role in new approaches to design. But on this basis, as always, it is possible to create good or bad architecture. On the other hand, as we have seen over recent decades, modern architecture is generally very classical, as it still tries to achieve a balance between fimitas, utilitas and venustas.

[a] The first point here is really not fully achieved, given that the ground floor is not very open-plan; and that without mentioning the servants' quarters, which hardly express modernity.

La Villa Saboya:
nuevos tipos estructurales que generan una nueva estética.

La Villa Saboya (1929), obra de Le Corbusier, es todo un manifiesto, figuras 31 a 33. Cumple los famosos *cinco puntos* de su nueva arquitectura: edificio sobre columnas[a], cubierta plana ajardinada, planta libre, fachada libre y ventanas corridas separadas de la estructura (*fenêtre en longeur*). La fachada muestra los soportes formando una trama, aunque en planta es menos regular de lo que parece en alzado, figura 31. Le Corbusier usará mucho las tramas regulares de soportes en contrapunto con particiones de formas irregulares y desconectadas de esa trama.
Los *cinco puntos* son posibles gracias a la gran capacidad de los nuevos materiales, donde el soporte de pequeñas dimensiones forma el elemento resistente vertical. Pero además, y por encima de todo, hay una voluntad de diferenciarse de la planta y la fachada clásica. Se recrea en la separación entre estructura y cerramiento y particiones. La cubierta plana no es más que otra oposición a lo clásico, propuesta cuando la tecnología para resolverlas todavía era deficiente. Lo mismo sucede con los soportes de planta baja y su diafanidad. Es decir, una nueva herramienta técnica se convierte en un arma estética, algo que siempre ha sucedido y creo que siempre sucederá. Es el Zeitgeist. La nueva técnica es usada para proponer una nueva estética. Pero la estructura, en esta obra y otras similares, no es generadora, hace más bien de catalizador.
Esa inversión de aspectos formales clásicos crea imágenes muy novedosas todavía hoy, figura 33.
Es decir, los nuevos materiales y los nuevos tipos estructurales tienen un papel crucial en los nuevos planteamientos formales. Pero a partir de ahí, como siempre, se puede hacer buena o mala arquitectura. Por otra parte, como se ha podido comprobar en los últimos decenios, la arquitectura moderna, en general, era muy clásica, ya que todavía trataba de equilibrar *firmitas, utilitas* y *venustas*.

[a] El primer punto en realidad no acaba de cumplirlo, la planta baja no es muy diáfana; por no hablar del resquicio que ahí se deja para las habitaciones del servicio, que para nada hablan de modernidad.

Figura 34: Ronchamp; vista exterior de fachadas sur y este. *Ronchamp, exterior view facades south and east.*

Figura 35: Fachadas norte y este. *North and east facades.*

Capilla de Ronchamp

Capilla de Ronchamp:
Influences of modern painting and sculpture.

Ronchamp Chapel (1954), by Le Corbusier, is a work produced in his maturity, and it is also highly singular within his career. It is built on the ruins of an old chapel that was destroyed in the Second World War. This lofty site is privileged.
This building is very much sculptural in its dimensions, and it was the first in a route that later on would often be explored figures 34 and 35. Its shape and colours are enormously influenced by modern painting and sculpture. The thick walls contain the remains of the old chapel, and although this is of great symbolical value it is little known.
The belfry, which is from the old chapel, is now at ground level figure 37. The typical tower and belfry has now been replaced with a skylight tower.
The interior, which is also famous, is lit by light which filters in not only from the skylight towers but also through windows in the thick walls figures 38 and 39.
The "visor" which forms the roof, the curved walls and other details all express the belief that concrete is a mouldable and universal structural material. This belief has now been qualified to a great extent, but it was widespread at the time. The width of the nave and the angle of the "visor" make it possible to resolve this many-shaped roof structure without any problems whatsoever.
The structure supports the sculpture, and its function is totally residual from the point of the view of the project. Its shape and size make this possible. Nothing here is canonical or purely functional, except, perhaps, for making a strong structure in this shape. This is an almost unprecedented masterwork.

Capilla de Ronchamp:
influencias de la pintura y escultura moderna.

La capilla de Ronchamp (1954), de Le Corbusier, es una obra de madurez, y además muy singular dentro de su propia trayectoria. Se asienta sobre los restos de una antigua capilla destruida en la Segunda Guerra Mundial. El enclave, en altura, es privilegiado.
Tiene una dimensión escultórica muy fuerte, siendo pionera en un camino que luego se explorará muy a menudo, figuras 34 y 35. Su forma y colores están enormemente influidos por la pintura y escultura modernas. Los gruesos muros contienen parte de los restos de la antigua capilla, algo de gran valor simbólico y poco conocido.
El campanario, procedente de la antigua capilla, se sitúa a ras de suelo, figura 37. La típica torre-campanario es ahora sustituida por una torre tragaluz.
El interior, también bien conocido, tiene una luz filtrada no sólo por las torres-tragaluz, figura 36, sino también por los gruesos muros, figuras 38 y 39.
La "visera" que forma la cubierta, la curvatura de los muros y otros detalles transmiten esa visión del hormigón como material estructural universal moldeable, creencia hoy día muy matizada pero muy de la época. La luz de la nave y el canto de la "visera" permiten resolver esa estructura de cubierta de muchas formas sin problema alguno.
La estructura sustenta la escultura, su función es totalmente residual desde el punto de vista de proyecto. El tamaño y la forma lo permiten. No hay aquí nada canónico o de simple oficio salvo, quizás, precísamente, el dotar a esa forma de una estructura resistente. Es una obra maestra sin casi precedentes.

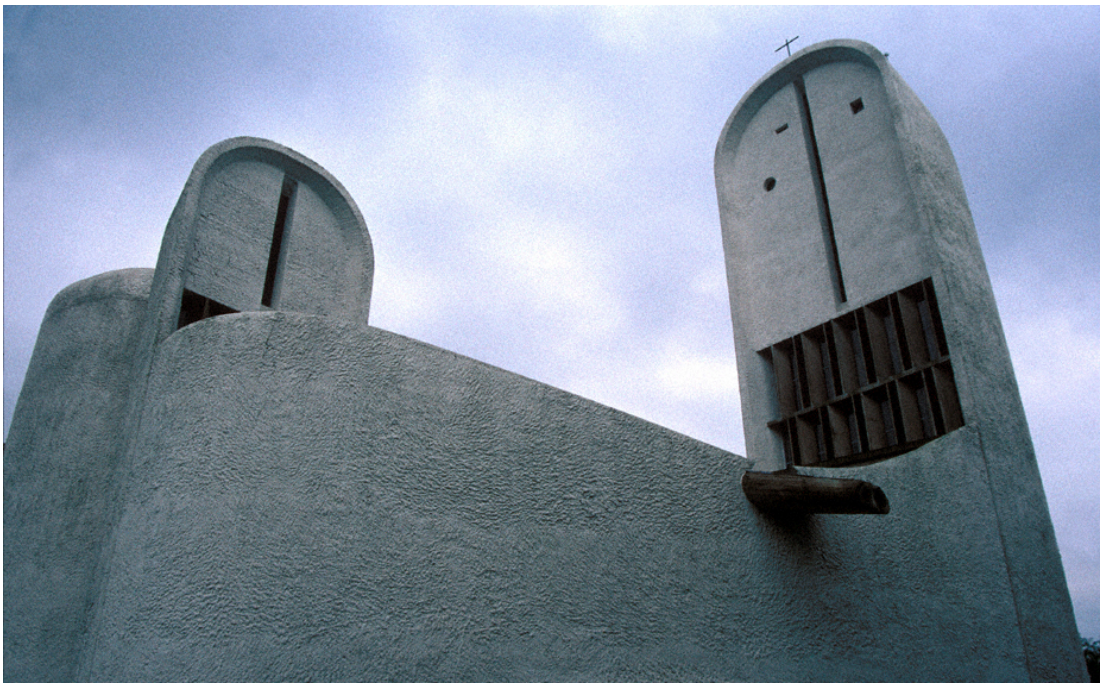


Figura 36: Exterior de los tragaluces. *Exterior view of skylights.*

Figura 37: Campanario en el suelo, con las antiguas campanas. *The belfry at ground level with the old bells*

Figura 38: Interior de la nave. *Interior view.*

Figura 39: Muros gruesos con vidrieras coloreadas. *Thick walls with coloured glasses.*

Figura 40: Capilla de la Resurrección, vista interior.
The Chapel of the Resurrection, interior view.

Figura 41: Vista interior, galería entre la nave y el exterior.
Interior view of gallery between the nave and exterior.

Figura 42: Exterior del ventanal que ilumina el altar.
Exterior views of the large window that illuminates the altar.

Capilla de la Resurrección

**La Capilla de la Resurrección:
combining Scandinavian classicism with modern architecture.**

The Chapel of the Resurrection (1941) by the architect Erik Bryggman stands in Turku cemetery, Finland figures 40 to 42. This work is prior to Ronchamp, and it seems unlikely that Le Corbusier did not know it. In any case, the large skylights of Ronchamp which replace the traditional bell tower are very similar to the lateral illumination of the altar here, although this uses a simple large side window, figure 42. This is no less intense inside than Ronchamp. But this is made using a classical language, including the classical handling of the structure.

The pillars separating the entry gallery from the nave could have easily been eliminated, given the thickness of the wall they bear, figure 40. But that would eliminate this screen, and would also complicate the work unnecessarily. That would be very foreign to the classical principles that govern the basic aspects of this work. Light is brought to the altar in a very simple way, far more so than in Ronchamp, and no less effectively.

Light management is the key in projects of this type, obviously much more so than management of the structure, which has to adapt to the overall concept. This is simple to do, on the other hand, given the dimensions of the work. Doing so well is a matter of skill.

**La Capilla de la Resurrección:
combinando clasicismo nórdico con arquitectura moderna.**

La Capilla de la Resurrección (1941), obra del arquitecto Erik Bryggman, está dentro del cementerio de Turku, Finlandia, figuras 40 a 42.

Es una obra, por tanto, anterior a Ronchamp. Parece difícil además que Le Corbusier no conociese esta obra. En cualquier caso, los grandes tragaluces de Ronchamp, que sustituyen al clásico campanario, tienen mucho que ver con la iluminación de un costado, del altar de esta obra, aunque lograda a través de una simple gran cristalera lateral, figura 42.

La intensidad de su interior no es, cuando menos, menor que la de Ronchamp. Pero está realizado con un lenguaje clásico, incluyendo el manejo también clásico de la estructura. El muro, el soporte, ...

Los soportes que separan la galería de acceso de la nave se podrían haber eliminado con toda facilidad, dado el muro de gran canto que sustentan, figura 40. Pero desaparecería ese filtro, complicando además la construcción de manera innecesaria, cosa muy alejada de los principios clásicos que gobiernan, en lo básico, esta obra.

La forma de introducir la luz al altar es también muy sencilla, mucho más que en Ronchamp, y no menos eficaz.

El manejo de la luz es clave en este tipo de proyectos, obviamente mucho más que el de la estructura, que debe adaptarse a la idea de conjunto. Cosa sencilla, por otra parte, dadas las dimensiones de la obra. Hacerlo bien es cuestión de oficio.

Figura 43: Aeropuerto de Stuttgart, vista interior. *Stuttgart airport, interior view.*

Figura 44: Detalle de un nudo del soporte. *Detail of a joint in pillars.*

Aeropuerto de Stuttgart

Structures:
funicular structures as "trees".

Terminal 1 of Stuttgart Airport (1991), figure 43, is by the architects Von Gerkan, Marg and Partners and the engineering company Weidleplan Consulting. Jörg Schlaich was the "checking engineer", a function that exists in Germany to validate a project created by the main engineer. This is a modular structure, with 4 × 3 modules measuring 26.6 m × 43.4 m. The trees are made of tubes, with 4 400 mm diameter tubes for the first branches and 160 mm diameter tubes for the last ones. The purlins and tie beams of the roof form a grid, composed of double T shapes with 340 mm edges.

Cast pieces are used to join the branches of the tree, figure 44, a material that is now able to withstand traction forces. This is a highly important detail of the design that is resolved very well, like the rest of this work. The trees are created on the basis of a funicular design, where for a specific load, normally a permanent one, only axial forces arise. More specifically, there are compression forces on the branches of the tree and traction forces in the roof grid. The whole area under compression is very sensitive to changes in load, as happens with arches. Notwithstanding this, the dimensions of the tree branches do not make them seem heavy.

This idea is not new. The first to suggest it was Félix Candela, followed very shortly afterward by Frei Otto. Candela's project had a stepped roof that facilitated the entry of light. More natural light would improve this project, which would integrate it better in the structure. The structure is the protagonist in projects of this type, and the concept has to be well-executed for it to be successful. But even so, other aspects such as the use of light, colour and finishes... are no less important.

Although structure generates project form, it has to be associated with an idea to unify everything, in this case the concept of a forest.

Estructuras:
funiculares como "árboles".

La terminal 1 del aeropuerto de Stuttgart (1991), figura 43, es obra de los arquitectos Von Gerkan, Marg and Partners y de la ingeniería Weidleplan Consulting. Jörg Schlaich actuó como "cheking engineer", una figura que existe en Alemania y que debe validar el proyecto hecho por el primer ingeniero.

Se trata de una estructura modular, con 4 × 3 módulos de 26,6 m × 43,4 m. Los árboles se construyen con perfiles tubulares, siendo 4 de 400 mm de diámetro en el arranque y teniendo un diámetro de 160 mm en las últimas ramas. Las correas y vigas de atado de la cubierta forman un emparrillado, construido con perfiles en doble T de 340 mm de canto.

Para las uniones entre ramas se usan piezas de fundición, figura 44, material que ahora ya permite resistir tracciones. Se trata de un detalle de gran importancia formal, muy bien resuelto, al igual que el resto.

Los árboles se crean a partir de un diseño funicular, donde, para una situación concreta de carga, normalmente la carga permanente, solo aparecen axiles. En concreto, compresiones en las ramas del árbol y tracciones en el emparrillado de cubierta. Toda la zona comprimida es muy sensible a los cambios de carga, como le sucede a los arcos. Con todo, se puede ver que las dimensiones de las ramas de los árboles no resultan pesadas.

La idea no es nueva. El primero en plantearla fue Félix Candela, y muy poco después Frei Otto. El proyecto de Candela tenía una cubierta escalonada que facilitaba la entrada de luz. En este proyecto se echa en falta más luz natural, y una mayor integración con la estructura.

En este tipo de proyectos la estructura es protagonista, y la buena ejecución de la idea es imprescindible para tener éxito. Aún con eso, otros aspectos, como el del manejo de la luz, el color, los acabados ..., no son menores.

La estructura es generadora de la forma del proyecto, pero asociada a una idea que lo aglutina todo, en este caso la del bosque.

Figura 45: Multihalle Manheim, vista interior general.
Multihalle Manheim, general interior view.

Figura 46: Detalle de la retícula de madera.
Detail of the wooden grid.

Figura 47: Detalles de borde.
Detail of the edge.

Pabellón multiusos de Manheim

Funicular designs: grid shell.

Manheim Multipurpose Pavilion (1973-1975) is an exceptional work, figures 45 a 47. It was designed by the architect Frei Otto, as the leader, together with Mutschler and Partners. ARUP analysed the structure, more specifically the engineers E. Happold and W. I. Liddell. The structural type here is a wooden grid shell. I.e., a shell composed of a meshwork of small interlocking wooden squares braced by diagonal cables.

This new idea was suggested by Otto, who also built scale models as an aid in the form-finding. The ground plan is irregular in shape, with maximum spans of approx. 60 m. The grid has a separation of 0.5 m × 0.5 m, and the double wooden strips in both directions measure only 50 mm × 45 mm. The grid was assembled on the flat floor and raised little by little until it attained the desired antifunicular shape, figure 46. The bracing diagonals were then added in the form of steel cables, while the covering is a semi-transparent cloth made of polyester fibres embedded in PVC. It is very probable that nowadays this would have used an almost transparent fabric like the ETFE used in the Eden Project, Cornwall, for example.

The funicular concept is used again at the edges, adding cables to the wooden, figura 47.

Once again the structure is the protagonist here. And not only that. This work required expertise in a sophisticated technique, as this was the first time that it was used. It opened up a route that was later followed by many subsequent projects, and this is still an active line of working.

The structural work of Happold and Liddell is impeccable; the key to a good final result. But the merit here is Otto's, with a project that is as original as it is effective, although, it has to be said, it was complicated and expensive to execute.

Diseños funiculares: grid shell.

El pabellón multiusos de Manheim (1973-1975) es una obra excepcional, figuras 45 a 47. Lo diseñan los arquitecto Frei Otto, como lider, y Mutschler and Partners. El análisis de la estructura es de ARUP y, en concreto, de los ingenieros E. Happold y W. I. Liddell. El tipo estructural es una lámina de madera tipo *grid shell*. Es decir, una lámina formada por un entramado de perfiles de pequeña escuadría de madera que se entrecruzan, arriostrados por cables en diagonal.

La idea, novedosa, es una propuesta de Otto, que además se encarga de construir modelos a escala como ayuda para el *formfinding*. La planta es irregular, con luces máximas de unos 60 m. La retícula tiene una separación de $0,5 \times 0,5$ m, y los listones de madera, dobles en cada dirección, tienen solo una escuadría de 50 mm × 45 mm.

La retícula se monta en el suelo plana, y poco a poco se va elevando hasta conseguir la forma antifunicular deseada, figura 46. Se añaden después diagonales de arriostramiento con cables de acero, y el cerramiento lo forma una tela semitraslúcida hecha de fibras de poliéster embebidas en PVC. Hoy día se hubieran usado, muy probablemente, telas casi transparentes, como el ETFE empleado, por ejemplo, en el Eden Project de Cornwall.

En los bordes se vuelve a utilizar el concepto de funicular, añadiendo cables a la trama de madera, figura 47.

De nuevo estamos ante obras donde la estructura es protagonista. No sólo eso. Se trata de obras que requieren el dominio de una sofisticada técnica, y además son pioneras en el uso de dicha técnica. Esta obra abre el camino a muchas otras posteriores. Hoy sigue siendo una línea de trabajo activa.

La labor en la estructura de Happold y Liddell es impecable, clave para el buen resultado final. Pero el gran mérito es de Otto, con un planteamiento de un tipo tan original como eficaz aunque, también hay que decirlo, con una ejecución compleja y costosa.

Figura 48: Olympiaturm, Munich. *Olympiaturm, Munich.*

Torre de comunicaciones Olympiaturm

A classic communications tower design: A free-standing reinforced concrete shaft.

The Olympiaturm communications tower (1965-68), figure 48, was built for the 1972 Munich Olympic games. The project is by Alfred Kunz GmbH and Co., and it is 291 m tall. The shaft is made of reinforced concrete, starting with a diameter of 16.5 m at the base and narrowing to 4.5 m at approx. 190 m, where there are several platforms, some of which rotate, and which are used for different purposes.

It is located in the Olympic Park, next to the stadium. There were no reasons why a less slender design could not have been used, or even a braced design such as the Collserola tower. But the approach was the classic one at the time: a slender shaft of reinforced concrete, in the form of a hollow circular tube, topped by platforms that were also circular and the antenna itself.

This was traditional at the time, when the general design was almost taken for granted and the project became an exercise, more or less virtuous, of analysis. There was competition to create the slenderest shaft.

Not only was there sufficient space, but also braced decks could have formed the perfect excuse to bring the tower design closer to that of these spectacular tensile roof structures (Figure 1.36). However, the tower was finished before they were erected. Otherwise, perhaps another design would have been used, one more similar to the Collserola tower (page 61).

That does not mean that the project as it stands is not highly worthy. But it is also clear that the general design of this structure used an existing type. Is that a bad thing? Not at all. A type becomes consolidated when it is a good solution. The question is whether, in this case, other more interesting options exist. It is always good to ask yourself that question, even when finally a classical solution is chosen as the best.

Un diseño clásico de torre de comunicaciones: fuste de hormigón armado en voladizo.

La torre de comunicaciones *Olympiaturm* (1965-68) se construye con vista a las olimpiadas de Munich de 1972, figura 48. Es un proyecto de Alfred Kunz GmbH and Co. Tiene 291 m de altura. El fuste es de hormigón armado, arranca con un diámetro de 16,5 m en la base y decrece hasta los 4,5 m a, aproximadamente, 190 m, donde se sitúan varias plataformas con distintos usos, alguna de ellas giratoria.

Está situado en pleno parque olímpico, junto al estadio. No había problemas para haber hecho un diseño con menos esbeltez, incluso atirantado como el la torre de Collserola. Pero el planteamiento es el clásico de la época: un fuste esbelto de hormigón armado, un tubo circular hueco, y unas plataformas, también circulares, en cabeza, más la propia antena.

Eso era lo tradicional en esa época, en donde se daba casi por hecho el planteamiento general y el proyecto de la torre se convertía en un ejercicio, más o menos virtuoso, de análisis. Se competía por hacer el fuste más esbelto.

No solo había disponibilidad de canto, sino que las cubiertas tensadas que rodean la base de la torre podrían haber sido la excusa perfecta para acercar el diseño de la torre al de esas espectaculares cubiertas. Claro que se acabó algunos años antes de verlas hechas. En caso contrario, tal vez el diseño hubiera sido otro, quizás más próximo, por ejemplo, a la torre de Collserola (página 61).

Eso no quiere decir que el proyecto actual no sea de una gran dignidad. Lo que sí está claro es que el planteamiento general de la estructura asume un tipo existente. ¿Es eso malo? En absoluto. Un tipo se consolida cuando es una buena solución. La cuestión es si, para ese caso, hay otras opciones más interesantes. Siempre es bueno hacerse esa pregunta; aunque finalmente se asuma, como la mejor, una solución clásica.

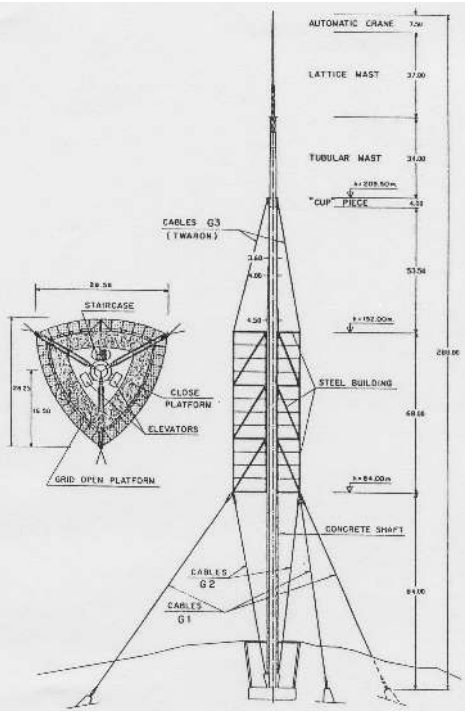


Figura 49: Torre de Collserola. *Collserola Tower.*

Figura 50: Detalle de anclaje de cables. *Cables anchorage.*

La Torre de comunicaciones Collserola

Collserola tower:
rethinking problems from the ground up.

Collserola communications tower (1990-92), which stands close to the Tibidabo in Barcelona, is 288.4 m tall, figures 49 and 50. The overall design is by Norman Foster, with the aid of the ARUP engineering company. The structural project is by the Spanish engineers Julio Martínez Calzón and Manuel Juliá Vilardell.
As Foster well remembers, the usual solution would have been a free-standing reinforced concrete shaft like the Olympiaturm, of about 25 m diameter at the base, page 59.
Given that it stands on a hill and there are no problems with increasing the width of its supports, Foster rethought the classical solution and proposed an innovative design in which the overall width is achieved by attaching anchor ties to the central reinforced concrete shaft, which is now only 4.5 m in diameter all the way up to the antenna. Additionally the platform is triangular, so that it is much wider than the central reinforced concrete shaft. This structure is tremendously effective.
The anchor ties are made of Kevlar to prevent interferences, and they are pretensed to notably increase their lateral rigidity (as is the case in other major works using anchor ties).
The original design planned only three external anchor ties, horizontally separated by 120°, with two cables at each corner of the tower. This gave rise to the problem that the narrower reinforced concrete shaft would have to provide all of the resistance against torsion. The Spanish engineers divided each external cable into two, so there were three at each corner of the triangular platform. This means that now the braced structure resists torsion too.
The platforms are metallic and were constructed at the base of the shaft before being raised up it. This is a brilliant constructive solution, like the rest of the project and structure, which are in complete symbiosis. And the structure, of course, is the source and protagonist.

La torre de Collserola:
replantearse los problemas desde cero.

La Torre de comunicaciones Collserola (1990-92) de Barcelona, cerca del Tibidabo, tiene una altura de 288, 4 m, figuras 49 y 50. El diseño general es de Norman Foster, con la colaboración de la ingeniería ARUP. El desarrollo del proyecto de la estructura es de los ingenieros españoles Julio Martínez Calzón y Manuel Juliá Vilardell.
Como bien recuerda Foster, la solución habitual hubiera sido la del fuste en voladizo de hormigón armado, similar a la de, por ejemplo, la *Olympiaturm*, con un fuste de unos 25 m en la base, página 59.
Dado que están en medio de una colina y no hay problemas para dar más canto, Foster se replantea esa solución clásica y propone un diseño innovador, en donde el canto global se consigue añadiendo tirantes al fuste central de hormigón armado, que ahora tiene solo 4,5 m en toda su altura hasta llegar a la antena. Además la plataforma se triangula de modo que el canto ahí es también mucho mayor que el del fuste central de hormigón armado. Es una estructura tremendamente eficaz.
Los tirantes son de kevlar para no crear interferencias, y se pretensan para aumentar, notablemente, la rigidez lateral (como sucede en otras grandes obras atirantadas).
El diseño original preveía solo tres tirantes externos, separados en planta 120° (dos a cada esquina de la torre). Eso tenía el problema de que la resistencia global a torsión debía asumirla en su totalidad el fuste de hormigón armado, ahora más fino. Los ingenieros españoles desdoblaron cada tirante externo en dos (tres a cada esquina de la torre), de modo que ahora la estructura atirantada resiste también a torsión.
Las plataformas son metálicas, se construyen en la base y se van izanado sobre el fuste de hormigón: una solución constructiva brillante, como todo el proyecto y la estructura, en absoluta simbiosis. Y la estructura, por supuesto, es generadora y protagonista.

Figura 51: Planta de las instalaciones deportivas de las Olimpiadas de Munich de 1972.
Ground plan of the sports facilities for the 1972 Munich Olympic Games.

Figura 52: Vista general del parque olímpico desde la torre de comunicaciones.
General view of the Olympic park from the Communications tower.

Figura 53: Componente estructural básico del estadio.
Basic structural component of the stadium.

Estadio olímpico de Munich

Munich Olympic stadium:
A milestone in tensile structure and an exceptional work of architecture and engineering.

The architect Günter Behnisch won the competition1 to design Munich Olympic park (1969-72), which covers a total of 270 hectares.[a] Figure 51 shows the current general plan of the park, which retains the main features of his original proposal. There are three basic elements here: the stadium, a large hall and the swimming pool, together with the areas that connect them. The Olympic stadium, figures 52 and 62, stands out to a very great extent.
Behnisch's first idea in the draft project called for an organic set of textile coverings that would connect and unify the different uses within the project. These covers merge in a way that is still exemplary with the green Bavarian landscape that surrounds them, the artificial lake included.At the time the technology of textile roofing materials was still at a very early stage. There was much more experience with the use of cables, in suspension bridges and bridges with anchor ties.
In 1968 Behnisch had finished, together with the engineers G. Scholz and J. Natterer, the famous tensile structure in Dortmund, with a span of 40 m. But what he planned here was far more complex. His draft project contained a serious error in the design of the structure, as we shall see.
In the mid 1950s Frei Otto had started to construct small textile roofing structures; and together with Rolf Gutbrod he had designed the German Pavilion for the Montreal Expo in 1967, which was a major qualitative and quantitative leap in the use of this technology. The structure was developed using physical models for form-finding as well as for analysis.

[a] Highly interesting proposals were presented in this competition. One of them, which was also visionary, was prepared by the great engineer Julius Natterer. He suggested a tensile roof too, but one made of wood. This was perhaps complex and risky in comparison with the winning project, which was complex and risky enough itself. Year later he built wooden structures using tensile technology, such as the German Pavillion in Hannover EXPO2000.

El estadio olímpico de Munich:
un hito en la estructura tensada y una obra de arquitectura e ingeniería excepcional.

El arquitecto Günter Behnisch ganó el concurso[a] del parque olímpico de Munich (1969-72), que ocupa un total de 270 hectáreas. La figura 51 muestra la planta general actual, que mantiene los grandes rasgos de su propuesta inicial.
El conjunto se compone de tres elementos básicos: el estadio, un gran hall y la piscina; más las áreas de conexión entre ellos. El estadio olímpico, figuras 52 y 62, destaca sobremanera.
La idea inicial de Behnisch, el *anteproyecto*, dicho de forma técnica, plantea un conjunto orgánico de cubiertas textiles que conectan y unifican los diferentes usos del proyecto.
Cubiertas que están fundidas, de una forma que hoy sigue siendo ejemplar, con el verde paisaje bávaro en el que se inserta, lago artificial incluido.
La tecnología de las cubiertas textiles, y de las tensadas en general, estaba entonces todavía en mantillas. Sobre el cable, de forma aislada, sí había mucha más experiencia procedente de los puentes colgantes y atirantados.
Behnisch había acabado en el 1968, con los ingenieros G. Scholz y J. Natterer, la famosa estructura tensada de Dortmund de 40 m de luz. Pero lo que planteaba era de mucha más complejidad. Su anteproyecto tenía un grave error de planteamiento en la estructura, como veremos.
Frei Otto había comenzado a construir a mediados de los 50 pequeñas cubiertas textiles; y diseña, junto con Rolf Gutbrod, el Pabellón Alemán para la Expo '67 de Montreal, dando un salto cualitativo y cuantitativo importante en el manejo de esa tecnología. La estructura se desarrolló a partir de modelos físicos, tanto para el *formfinding* como para el análisis.

[a] Al concurso se presentaron propuestas de gran interés. Una de ellas, también visionaria, fue hecha por el gran ingeniero Julius Natterer, que propone una cubierta también tensada pero hecha con madera, aunque quizás demasiado compleja y arriesgada en comparación con la ganadora, que ya lo era mucho. Años después construiría estructuras de madera con el uso de tecnología tensada, como el Pabellón alemán de la EXPO2000 de Hannover.

Figura 54: Imagen de uno de los anclajes de borde.
Photograph of one of the edge anchorages.

Figura 55: Paneles de plexiglas.
Plexiglas panels.

Figura 56: Apoyo de los paneles de plexiglas.
Support of plexiglas panels.

What is form-finding? When a structure is hypostatic (with fewer balanced equations than unknown ones), like here, and like a clothesline, the final shape is the first unknown. This is something new, and it only occurs in tensile structures. In superficial structures the problem was formidable.
Otto built a 1/75 scale model in the now almost legendary Institute for Lightweight Structure (ILS) which he directed, and which is now known as the ILEK. New photogrammetric techniques were used, with the help of Stuttgart University Geodesic Institute (IFG). This experience would be used in Munich, especially for the swimming pool.
It is not surprising that when work on the Munich project started in 1969 they called Otto as the consultant.[a] For Behnisch, calling Otto was both a good decision and a serious mistake. Otto, who was no doubt a brilliant professional, tended to occupy the whole stage himself. Who nowadays has heard of the role of Behnisch[b] or that of the many brilliant engineers involved in such a singular work? It cannot be denied that the constructed work contains many of the ideas present in Behnisch's draft project. We will go on to talk about the engineers later.
An important datum is that the cost of the project was equal to that of its construction.[c] This was therefore a group effort and a great applied research project. And more than that, as I believe that with this work Germany reclaimed its return to the group of the world elite in technology.

[a] Other important figures, such as Heinz Isler, also offered advice during these first steps, in this case due to his experience in irregular anti-funicular roofs, which were conceived, analysed and checked using physical models. This was something that Otto did, too.

[b] Benisch proved in many subsequent works (see for example `http://behnisch.com/`) that he is a magnificent architect.

[c] There is lot of bibliography. Mick Eckhout Eckhout, 1971 is only a good start point.

¿Qué es el *formfinding*? Cuando la estructura es hipoestática (menos ecuaciones de equilibrio que incógnitas), como aquí, como en un cable de tender la ropa, la forma final es la primera incógnita. Esto es algo nuevo, solo sucede en la estructura tensada. En estructuras superficiales, el problema era formidable.
Otto construyó un modelo a escala 1/75 en el ya casi mítico Institute for Lightweight Structure (IL) que dirigía, ahora llamado ILEK. Se usaron nuevas técnicas de fotogrametría con la colaboracíon de Klaus Linkwitz, del Instituto de Ingeniería Geodésica de la Universidad de Stuttgart (IFG). Esa experiencia se utilizará en Munich, en especial en la piscina.
No es de extrañar que cuando, en 1969, se empieze a desarrollar el proyecto de Munich llamen a Otto como asesor.[a]
Llamar a Otto fue para Behnisch, al mismo tiempo, un gran acierto y un gigantesco error. Otto, sin duda un profesional genial, tendente a acaparar para sí todos los focos de la escena. ¿Quién conoce hoy día el papel de Behnisch[b] y el de un numeroso grupo de ingenieros brillantes en esta obra tan singular? Es innegable que la obra construida mantiene muchas de las ideas presentes en el anteproyecto de Behnisch. De los ingenieros hablaremos después.
Un dato importante: el coste del proyecto igualó al de la construcción.[c]
Es decir, es una obra coral y un gran proyecto de investigación aplicada. Más que eso; con esta obra, en mi opinión, Alemania reclama su vuelta al grupo de élite mundial en tecnología.

[a] Otras figuras importantes, como Heinz Isler, asesoran también en esos primeros pasos, en este caso por su experiencia en cubiertas antifuniculares irregulares concebidas, analizadas y comprobadas gracias a modelos físicos, algo que Otto también hacía.

[b] Benish demostró, en muchas otras obras posteriores, ser un magnífico arquitecto (véase por ejemplo `http://behnisch.com/`).

[c] Hay mucha bibliografía. El artículo Mick Eckhout Eckhout, 1971 es un sólido punto de partida.

Figura 57: Detalles de borde y transición de cables.
Details of the edge and cable transition.

Figura 58: Estructura de hormigón del graderío bajo la cubierta.
The concrete structure of the stands under the roof.

Figura 59: Vista interior de la piscina.
Interior view of the swimming pool.

What basic structural error did Behnisch's draft project contain? He wanted to use only textile sheets ("cloths") for the fabric of the tensile roofing, apart from the edge cables. Given the dimensions of the stadium or swimming pool, this was unfeasible. Cables had to be used too in the final structural levels. Cloth can cover a maximum span of approx. 15 m, and it is also very important that if it tears (collapses) this will not bring down the structure as a whole. It has to be an independent structural element. If we examine textile constructions we will see this principle in use. Frei Otto rethought the basic stadium project, defining its structure in a way that was already very close to its final state figures 53 and 54. There can be no doubt that this is why he is one of the central characters in this history.

In this new plan, the walls are now composed of 3 m × 3 m plexiglas panels, figures 55 and 56, and are supported by the tensile structure rather than forming a part of it. The final order of the tensile structure is composed of a network of 14 mm diameter steel cables running vertically and horizontally 0.75 m apart, figure 54. They are anchored to 80 mm diameter cables. The main edge of the stadium, which covers a span of 195 m, is composed of 10 120 mm diameter cables. The whole system is pretensed to ensure its rigidity.

New techniques are used, such as anchoring the main cables to their bases using resin and steel balls, and traction-resistant cast metal, figure 54. The Plexiglas panels, used for the first time in this context, would shrink notably in case of fire, allowing smoke to escape at high temperatures which would otherwise damage the cables. The anchorage of these panels is as sophisticated as it is beautiful.

¿Qué error básico tenía, estructuralmente, el anteproyecto de Behnisch? Pretendía resolver los paños de las cubiertas solo con láminas textiles ("telas"), cables de borde aparte. Dadas las dimensiones del estadio, o de la piscina cubierta, ese planteamiento era inviable. Era necesario introducir cables también en los últimos órdenes estructurales. La tela puede cubrir un máximo de unos 15 m de luz, y además, cosa muy importante, tiene que fijarse de modo que si se rasga (colapsa) no arrastre al conjunto de la estructura. Debe ser un elemento estructural autónomo. Si nos fijamos en construcciones textiles veremos aplicado este principio.

Frei Otto replantea el proyecto básico del estadio, definiendo la estructura de una forma ya muy próxima a su estado final, figuras 53 y 54. Es por ello, sin duda, uno de los protagonistas de esta historia.

En ese nuevo esquema, el cerramiento, formado ahora por paneles de plexiglás de 3 m × 3 m, figuras 55 y 56, no forman parte de la estructura tensada, se apoyan sobre ella. El último orden de la estructura tensada lo compone una red de cables de acero de 14 mm de diámetro en cada dirección a una separación de 0,75 m, figura 54. Estos están anclados a cables de 80 mm de diámetro. El borde principal de estadio, que salva una luz de 195 m lo forman 10 cables de 120 mm de diámetro. Todo el conjunto se pretensa para poder ser rígido.

Se usan nuevas técnicas, como el anclaje de los cables principales en las mazarotas con resinas y bolas de acero y la fundición con resistencia a tracción, figura 54. Los paneles de plexiglás, ya de por sí novedosos en este ámbito, reducirían su dimensión notablemente en caso de incendio dejando salir el humo a altas temperaturas, que de otro modo dañaría a los cables. El anclaje de esos paneles es tan sofisticado como bello.

Figura 60: Vistas de las zonas del graderío sin cubierta. *Views of parts of the stands without the roof.*

Figura 61: Vistas de las zonas del graderío con cubierta. *Views of parts of the stands with the roof.*

Additionally, two new mathematical form-finding algorithms were created for application in a computer (which were yet to come into systematic use in civil engineering or architecture).
One of these algorithms was invented by K. Linkwitz and H.J. Schek in the IFG. The other one was invented by Joha Argyris, D. Scharf and Th. Angelopoulos in Stuttgart University Statics and Dynamics Aerospace Design Institute (ISD). They are both still in use, especially the first one (the force density method).
Weren't physical models enough for the form-finding, which as we said was the case in Montreal? Physical models combined with photogrammetric techniques were used. However, in the summer of 1969 the IFG warned that they were not sufficiently precise for this case. A mathematical model was needed, and this was created by computer.
Something similar to the process in architecture happened in engineering, as reinforcements were required. The engineering was led from the first by Fritz Leonhardt (Leonhardt and Andrä), where the young Jörg Schlaich worked, together with Arge Stahlbau Dach.
Schlaich asked the French engineer Biggany, who had worked with cable networks, for help in 1969. He also asked Argyris, one of the pioneers in developing the finite elements method (FEM) and in implementing it in computers.
The synchronisation of the different teams could have been improved. The swimming pool, which was directed by Otto, was developed using only physical models and photogrammetric techniques, while computers were used as well for the hall and stadium. Leonhardt and Andrä worked more on the latter two, especially the stadium. The models were used in wind tunnel tests in all cases.
Nobody remembers the structure of the stands themselves, figure 58: this is in concrete, as is logical. I do not believe that very much thought went into these lower spaces. It is as if they did not exist. The use of tensile structure confers visual lightness on this work. On what can be seen of the work, that is. Half of the construction is underground, in the anchorages of the main cables. That is why tensile structures are not used more often. Due to that and the technical complexity of the project and the construction itself, as specialists in both fields are needed.

Pero, además, se crean dos nuevos algoritmos matemáticos de *formfinding*, (en aquellos años, la informática todavía no había entrado, de forma sistemática, ni en la ingeniería civil ni en la arquitectura).
Uno de esos algoritmos se inventa en el IFG, por K. Linkwitz y H.J. Schek. El otro en el Instituto de Estática y Dinámica en Aviación y Construcción Aeroespacial de la Universidad de Stuttgart (ISD), por Joha Argyris, D. Scharf y Th. Angelopoulos. Todavía están en uso, especialmente el primero (el método de la *Densidad de Fuerza*).
¿No bastaban los modelos físicos para el *formfinding*, como comentamos que se hizo en Montreal? Se fabricaron modelos físicos combinados con técnicas fotogramétricas. Pero el IFG advirtió, en el verano de 1969, que su precisión no era suficiente en este caso. Se necesitaba un modelo matemático, y con él, vendría de la mano la informática.
En la ingeniería sucede también algo similar a lo que pasó con la arquitectura: se necesitaban refuerzos. La ingeniería la lidera desde el principio Fritz Leonhardt (Leonhardt, Andrä und Partner), donde trabaja un joven Jörg Schlaich, con la colaboración de Arge Stahlbau Dach. Schlaich pide la colaboración, en 1969, del ingeniero francés Biggany, que había trabajado en redes de cables, y también a Argyris, uno de los pioneros en el desarrollo del método de los elementos finitos (MEF) y de su implementación en el ordenador.
La sincronización de los distintos equipos no fue perfecta. La piscina se desarrolla, dirigida por Otto, solo con modelos físicos y técnicas fotogramétricas. En el hall y el estadio sí se usó además el ordenador, donde Leonhardt and Andrä tenía más peso, en especial en el estadio. En todos los casos, los modelos se sometieron a ensayos en tunel de viento.
De la propia estructura del graderío nadie se acuerda, figura 58, hormigón, lo lógico. Esos espacios inferiores no están, creo, muy cuidados. Es como si no existiesen.
El uso de la estructura tensada daba una ligereza visual a la obra. A lo que se veía de la obra, claro. La mitad de la construcción está bajo tierra, en los anclajes de los cables principales. De ahí que la estructura tensada no se use tan a menudo. Por eso y por la complejidad técnica de proyecto y de construcción; se requieren especialistas en ambos ámbitos.

Figura 62: Estadio olímpico, vista general. *The Olympic stadium, general view.*

Moreover, in this case, the whole rib along the edge that spans 195 m is an indirect way of transmitting the loads, as the basic problem is shorter, the span over the stands. It is only necessary to compare the solution here with that in the Allianz Arena (página 73).[a]

The fixation in the plan on the single solution of textile roofing also gave rise to problems. For the covered swimming pool, figure 59, and the hall this was not the best solution, as a roof with better thermal insulation would have been preferable.

The stadium has the capacity for approx. 70000 spectators, a normal number. However, the asymmetrical roof is lacking in functional terms, as it does not even cover half of the seats, figure 60.

These deficiencies can be explained once we learn that the structure was meant to be temporary. Today that is hard to believe. In more than 40 years of use, the only action taken has been to change the Plexiglas panels.

The technical leap that this work involved, in just four years, was brutal. For the tensile structure and particularly the roofing, it was a turning point in 3D. And it was only possible thanks to the aid of a group of exceptional professionals.

But above all it is a work of enormous beauty that reminds us of the close relationship between *firmitas* and *venustas* in many of the best avant garde works. In this respect, this work is as classical as the Pantheon in Rome. For projects of this type their iconic nature is one of their basic requisites. The reader should have no doubt that all architects and engineers must visit Munich, if only to see this work.

[a] It is extremely instructive in many ways to compare both stadiums, and particularly the role of structure in their projects. Both of them are magnificent works.

Es más, en este caso, todo el nervio de borde que salva 195 m supone una forma poco directa de equilibrar las cargas, ya que el problema básico es menor: la luz de las gradas. No hay más que comparar lo hecho, por ejemplo, en el Allianz Arena (página 73).[a]

El planteamiento tan unitario de las cubiertas textiles también tenía sus problemas. Para la piscina cubierta, figura 59, y el hall no eran la mejor solución. Hubiera sido preferible contar con un cerramiento con mayor aislamiento térmico.

El estadio tiene capacidad para unos 70.000 espectadores, cifra usual. Pero la asimetría de la cubierta introduce una carencia funcional. La cubierta no cubre ni la mitad de los asientos, figura 60.

Esas carencias se explican cuando sabemos que se pretendía que la construcción fuese **temporal**. Hoy cuesta creerlo. En más de 40 años de uso, lo único que se ha hecho es cambiar, recientemente, las placas de plexiglás.

El salto técnico dado en esta obra, en solo cuatro años, fue brutal. Para la estructura tensada, y particularmente en cubiertas, en 3D, supuso un antes y un después. Y solo fue posible gracias a la colaboración de un grupo de profesionales excepcionales.

Pero por encima de todo, es una obra de una enorme belleza, que nos recuerda la estrecha vinculación entre la *firmitas* y la *venustas* en muchas de las mejores obras de vanguardia. En ese sentido, es tan clásica como el Panteón de Roma. Y en este tipo de proyectos, su caracter icónico es requisito básico del proyecto.

El lector no debe tener duda alguna de que Munich, sólo por esta obra, es una visita ineludible para todo arquitecto e ingeniero.

[a] Comparar ambos estadios es sumamente instructivo en muchos aspectos, y en particular por el papel de la estructura en el proyecto, siendo ambas obras magníficas.

Figura 63: Allianz Arena, vista general.
Allianz Arena, general view.

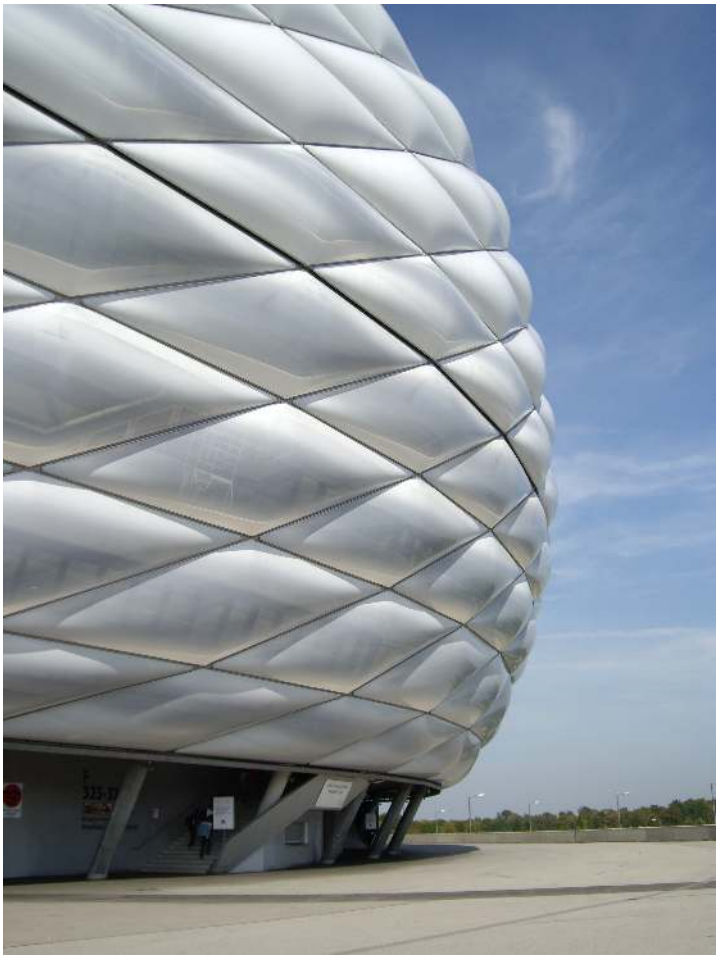


Figura 64: Accesos y fachada del estadio.
Access and facade.

Estadio Allianz Arena, Munich

The Allianz Arena:
high quality architecture in a conventional and effective structure that is not emphasised.

The Allianz Arena football stadium in Munich (2002-05), is by Herzog and De Meuron. These two architects have created highly interesting projects, and I believe this to be one of them. These usually work without making visual use of the structure. In principle this is neither good nor bad.
The stadium was for use by two teams in the city, FC Bayern München and TSV 1860 München, which was a challenge. To personalise its image depending on its use, the architects proposed using ETFE "cushions", figures 64 and 67. Although these are normally white, they can be lit in red when Bayern plays and blue when TSV does. This is a good idea, and it also creates a modern and interesting facade. It has enormous visual impact during the day and even more at night. This skin also covers the roof, like a vast translucent tyre.
Unlike the old Olympic stadium, page 63, this one is only used for football, so that the whole of the stands, figure 65, about 70,000 spectators (like the old stadium) surround the whole pitch symmetrically. They form, as architects say, "a large crater" at three levels. And all of the seats are covered (unlike the old stadium).
The stands and points of entry are behind the skin. They consist of a concrete structure with prefabricated walls, figure 66. An impeccable approach. Given this whole distribution band it is simple to design a roof using large projecting steel trusses. As the roof is also made of ETFE, another fabric is under the trusses to sh ade spectators from the sunlight. This means that the trusses are not clearly visible, but rather are sensed (Figure).

Estadio Allianz Arena:
arquitectura de calidad con una convencional y eficaz estructura en segundo plano.

El estadio de fútbol Allianz Arena de Munich (2002-05), es obra de Herzog y De Meuron. Estos arquitectos tienen proyectos de gran interés, como creo lo es este, y suelen diseñarlos sin apoyarse visualmente en la estructura. Y eso, en principio, ni es bueno ni es malo.
El estadio debía ser usado por dos equipos de la ciudad, el FC Bayern München y el TSV 1860 München, todo un reto. Para personalizar la imagen según su uso, proponen una fachada con "almohadillas" de ETFE, figuras 64 y 67, que normalmente tienen un color blanquecino pero que se pueden iluminar de rojo cuando juega el Bayern y de azul cuando lo hace el TSV. Una buena idea, que además produce una fachada moderna e interesante, con un enorme impacto visual por el día y todavía más por la noche. La piel abarca también a la cubierta. Es como un gran neumático traslúcido.
A diferencia del antiguo estadio olímpico, página 63, este solo se usa para jugar al futbol, de manera que todo el graderío, figura 65, unos 70.000 espectadores (como en el antiguo), rodean simétricamente al campo de juego formando, como los arquitectos dicen, "un gran cráter" a tres niveles. Y con todos los asientos a cubierto (no como en el olímpico).
Las gradas y accesos se sitúan detrás de la piel, construidos con una estructura de hormigón, prefabricada en los forjados, figura 66. Un planteamiento impecable. Con toda esa banda de distribución, es sencillo plantear la estructura de cubierta con grandes cerchas de acero en voladizo. Como el cerramiento de cubierta también es de ETFE, sitúan bajo las cerchas otra tela que proteja del sol, de modo que las cerchas no se aprecian con claridad, solo se intuyen.

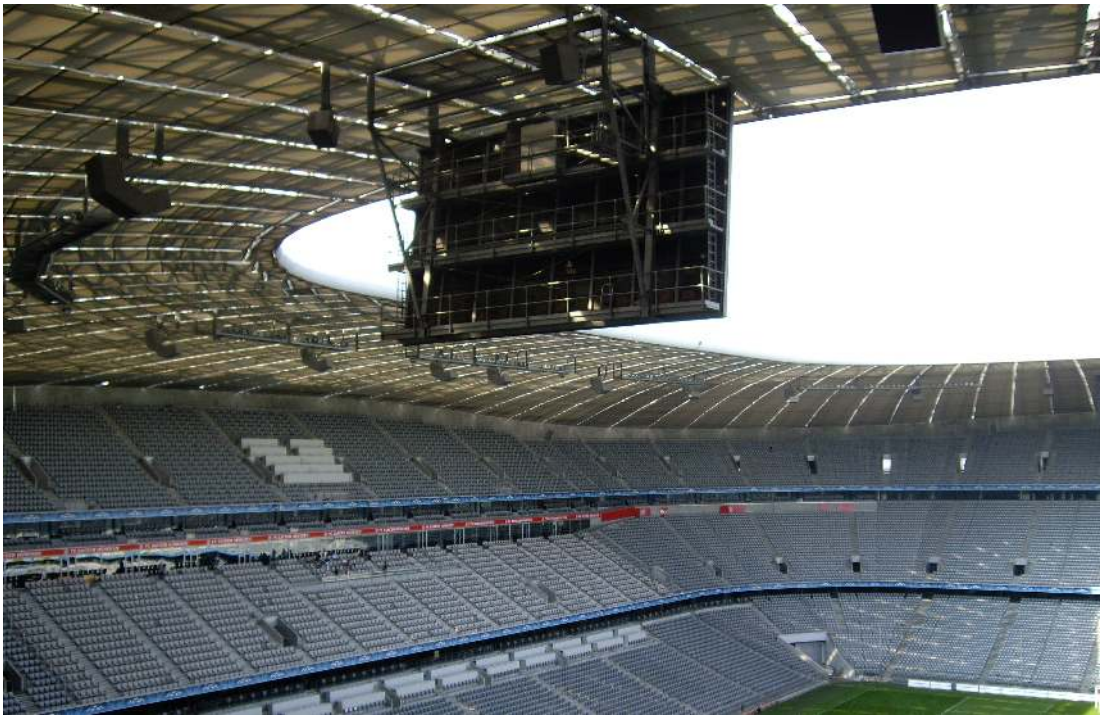


Figura 65: Interior del estadio. *Stadium interior.*

Figura 66: Distribuidores del graderío. *Stand entrances.*

Figura 67: Detalle de los elementos de fachada.
Detail of facade elements.

These trusses, which span about 60 m support the loads of the supports in the most direct way possible, in a simple yet effective way. The unit cost of this structure is far lower than that of the tensile structure of the older stadium.
This stadium offer users notable advantages in comparison with the older one, and it is more solid in functional terms. Although both stadiums are icons of the city, the Olympic one has an international dimension that the modern one does not require. Both of them are great works. For someone who loves structures and technology in general, the tensile roofing of the older stadium is unique.
It may seem paradoxical that the skin of this stadium has such as strong impact without using the structure at all, and that the latter is not even visible inside the stadium. The fact is that the secondary role of the structure here is, I believe, more than justified. And if moreover it is effective, what more can you ask for?
This central role of the skin, using new materials, is one of the differentiating traits of contemporary architecture. The creation of new images has an unstoppable appeal. The new CAD programs, and most especially the ones that can be parameterised, are being used to support this tendency.

Esas cerchas, de unos 60 m de luz, llevan las cargas a los apoyos de la forma más directa posible y con un esquema simple y eficaz. Es una estructura con un coste unitario mucho menor que la tensada del antiguo estadio.
Para el usuario, el Allianz Arena presenta notables ventajas frente al olímpico, es una obra funcionalmente más sólida. Ambos son iconos de la ciudad. El estadio olímpico tenía, no obstante, una dimensión internacional que este no requería. Ambas son grandes obras. Para un amante de las estructuras y, en general, de la tecnología, las cubiertas tensadas del antiguo son algo único.
Podría resultar paradójico que la piel del estadio tenga un impacto tan fuerte, sin recurrir en absoluto a la estructura, y que incluso en el interior esta no se aprecie. Lo cierto es que el papel secundario de la estructura está aquí, a mi entender, más que justificado. Si además es eficaz, ¿qué más se puede pedir?
Este protagonismo de la piel, con nuevos materiales, es uno de los rasgos diferenciales de la arquitectura contemporánea. La creación de nuevas imágenes tiene un atractivo imparable. Los nuevos programas de CAD, en especial los parametrizables, están sirviendo de soporte a esa tendencia.

Figura 68: Puente sobre el rio Sil cerca de Ponferrada.
Bridge over the river Sil close to Ponferrada.

Figura 69: Construcción de un extremo de las celosías.
The construction of both halves at the sides of the span.

Figura 70: Detalles de la unión de la cercha y el tablero.
Details of the beam joint.

Puente sobre el Sil

Steel truss beams:
joints with large steel plates and box sections made using steel plates.

This bridge over the river Sil (2000), figure 68, is close to Ponferrada and carries the N-VI motorway. It is by the FHECOR engineering company, led by Hugo Corres. This bridge is composed of a continuous beam with an edge that varies in width. It is built of a mixed steel-concrete lattice (of weathering steel in the lattice that is structurally connected to the concrete deck). The central span is 170 m long, and the total of three spans measures approximately double this in all, at 340 m.
Each half of the double beam, forming a box, was built at the side of the span and then launched over each reinforced concrete pillar, figure 69. The curved shape of the lower level of the beam, which generates the varying width of the edge, did not aid the launching process.
The joining system is the outstanding feature of this project, together with its relationship with the shape of the cross-section of the bars, figure 70. This question is highly important in arched beams, above all if they are made of wood, although this is also the case for metal structures.
The joint must not be a weak point, and to ensure this the configuration of the bar cross-section is crucial. The strongest way to make a metal joint in an arched beam is the one used here. It was invented by the well-known German engineer Fritz Leonhardt. It consists of using a plate in a single piece for the joint itself, and the bars to be connected are welded on to it. Additionally, and as may be seen in figures 69 and 70, the metal is rounded to prevent the concentration of stresses. The boxes are step welded to improve the reliability of the joint. The steel plates are several centimetres thick.
This idea became feasible once techniques for cutting very thick metal plate emerged, using oxy-gas, laser or plasma cutting. Leonhardt used this new technique in a highly effective rethink of the arrangement of the sections in a metal arched beam.
The importance of detailed design in a structure can be seen here, as well as how this is linked to its general geometry. And the link between form and constructive technique also becomes apparent. A whole lesson in itself.

Cerchas de acero:
unión con grandes chapones y secciones en cajón también hechas con chapones.

El puente sobre el río Sil (2000), figura 68, cerca de Ponferrada, para el paso de la autovía N-VI, es obra de la ingeniería FHECOR, liderada por Hugo Corres.
Se trata de un puente formado por una viga continua de canto variable construido con una celosía mixta de acero-hormigón (de acero corten en la celosía conectado estructuralmente al tablero de hormigón). El vano central es de 170 m, con un total de tres vanos de una longitud total de aproximadamente el doble, 340 m.
Cada mitad de la cercha, doble, formando un cajón, se construye al borde del vano y luego se lanza sobre cada soporte de hormigón armado, figura 69. El trazado curvo del cordón inferior, que genera el canto variable, no facilita ese lanzamiento.
De este proyecto se quiere destacar el sistema de unión, y su relación con la configuración de la sección de las barras, figura 70. Esta cuestión es trascendental en la cercha, sobre todo si es de madera, pero también lo es en la estructura metálica.
La unión no debe ser el punto débil y, para ello, el cómo se configure la sección de las barras es crucial. La forma más potente de hacer una unión metálica de una cercha es justamente la que aquí se usa. La idea es del conocido ingeniero alemán Fritz Leonhardt. Se trata de usar una placa de una sola pieza para la propia unión, a la que se sueldan las barras que acometen. Además, y como se puede ver en las figuras 69 y 70, la chapa se redondea para evitar concentración de tensiones. Los cajones se sueldan en escalón de modo que se mejore la fiabilidad de ese enlace. Las chapas tiene varios centímetros de espesor.
La idea es viable desde que aparecen los cortes mecanizados de chapas de grandes espesores, bien por oxicorte, laser o plasma. Leonhardt aprovecha esa nueva técnica para replantear, de forma muy eficaz, la organización de las secciones de la cercha metálica.
Aquí se puede ver la importancia del diseño del detalle en la estructura, y cómo está vinculado a su geometría general. Y se puede comprobar, asi mismo, la relación entre forma y técnica constructiva. Toda una lección.

Figura 71: Edificio Media-TIC, vista exterior. *The Media–ITC Building, exterior view.*

Figura 72: Detalle de las celosías. *Detail of trusses.*

Media-TIC

Steel truss beams:
Joining with large steel plates and box sections which are also made of steel plate.

The Media-TIC building (2010), located in Barcelona, figures 71 and 72, is by the architect Enric Ruiz-Geli and the Cloud-9 office, while the structure was designed and developed by Agustí Obiol of the BOMA. It is part of the renewal of Barcelona@22 District, which aims to regenerate a deteriorated area by inserting new "clean" technology companies. The Media-TIC building is a centre designed, as its name indicates, for new information and communications technologies (ICT).
It has the dimensions of a cube measuring approx. 40 m along each edge, with a ground plan of 36 m × 44 m and a height of 38 m. The main structure, figure 72, is composed of four arched-beam porticos 14 m apart. All of the walls hang from the main beam of these porticos, giving rise to one of the most important images of the building. Thanks to this beam there are no central supports in the ground entry floor. Mixed steel-concrete main beams are built between the porticos, leaving spans of approx. 2.5 m in the walls, which are made of structural steel plate.
The main truss beams are assembled on the ground and hoisted into their final position, where they rest on large supports in the side beams. These main arched beams are constructed in a similar way to those of the bridge over the river Sil in Ponferrada described above, page 77. Technology was transferred from civil engineering, something that is quite common.
The structure is quite deliberately used as the core of the project image. Nobody is obliged to leave the ground floor free of central supports, as this is a project decision that arises due to the image of the superstructure which is desired. The long arched beams span about 30 m. It is no problem to hang all of the walls from them on condition that they are wide enough, as is the case here, with a span-width ratio of about 6.5. Other elements too are of interest, especially the facades. As a whole this is a very valuable project.

Cerchas de acero:
unión con grandes chapones y secciones en cajón también hechas con chapones.

El edificio Media-TIC (2010), situado en Barcelona, figuras 71 y 72, es obra del arquitecto Enric Ruiz-Geli y el despacho Cloud-9, siendo la estructura diseñada y desarrollada por Agustí Obiol del BOMA. Forma parte de la renovación del llamado Distrito 22@ Barcelona, que pretende regenerar una zona deteriorada insertando empresas de nuevas tecnologías, empresas "limpias". El Media-TIC es un centro destinado, como su nombre indica, a las nuevas tecnologías de información y comunicación (TIC). Tiene las dimensiones de, aproximadamente, un cubo de 40 m de lado: una planta de 36 × 44 m y una altura de 38 m. La estructura principal, figura 72, formada por cuatro grandes pórticos en cercha separados 14 m, de cuya viga principal cuelgan todos los forjados, es una de sus imágenes principales. Gracias a esa cercha se libera de soportes centrales la planta baja de acceso.
Entre los pórticos se construyen unas jácenas mixtas de acero-hormigón, dejando unas luces de forjado de unos 2, 5 m, que se resuelve con chapa de acero colaborante.
Las vigas-cercha principales se construyen en el suelo y se izan hasta su posición final apoyadas en los grandes soportes. Esas vigas-cercha principales se construyen de forma similar a las del Puente del Sil en Ponferrada antes descrito, página 77. Hay una transferencia de la tecnología de obra civil, cosa nada extraña.
La estructura se usa como parte principal de la imagen del proyecto de manera deliberada. Nadie obliga a dejar libre de soportes centrales la planta baja, es una decisión de proyecto relacionada, a su vez, con la imagen deseada de una superestructura. La luz de las grandes vigas-cercha es de unos 30 m. Colgar de ellas todos los forjados no es problema si se dispone del canto adecuado, como es el caso, dejando una relación luz-canto en torno a 6, 5.
Hay otros elementos de interés, en especial las fachadas. En conjunto es un proyecto de gran valor.

Figura 73: Pasarela en Viamala, vista general. *Viamala footbridge, general view.*

Figura 74: Detalle de la estructura de banda tesa. *Detail of stressed ribbon structure.*

Pasarela Punt da Suransuns

Punt da Suransuns:
an extraordinary stress-ribbon footbridge.

Punt da Suransuns footbridge (1999), figure 73, which is by the engineer Jürg Conzett, is a stressed ribbon structure. It crosses the river Hinterrhein in Viamala canyon, Switzerland.
It spans 40 m, with a total span-width ratio of 40, so it is quite slender. Its free width measures 0.85 m, and the granite blocks that form the deck measure 60 mm × 250 mm × 1100 mm, i.e., they are only 60 mm thick. 3 mm thick aluminium strips are inserted between the granite blocks, which are from the nearby city of Andeer. It is tensed by four 15 mm × 60 mm steel bands.
These are pretensed funicular structures. The lower bands or cables are pretensed ("tautened") against the element that rests on them, which is usually reinforced concrete; figures 73 y 74. In this case they are pretensed against the granite blocks that form the deck of the footbridge.
This pretensing solution, with traction and compression forces, is the only way of pretensing without external actions with balancing weights that equalise the stressed ribbon traction, with two elements that have the same curvature sign, i.e., a synclastic curvature.
The handrail includes a crucial detail, as the vertical rods function as ties between the taut band and the stone deck, which greatly increases the stability of the whole structure after pretensing.
Pretensing greatly increases the rigidity of the structure, which as was pointed out above has an overall slenderness of 40. The price to be paid for this can be found at the points where each end is anchored to the terrain.
Although this type of structure is relatively recent, it is consolidated. It requires a highly skilled designer. In this case the use of local granite makes it even more exceptional, as this integrates it in its location brilliantly. The structure here is not only the protagonist, as it is a structural showpiece and, above all, a magnificent work. Its design and execution go far further than skill in analysing complex structures.

Punt da Suransuns:
una extraordinaria pasarela de banda tesa.

La pasarela Punt da Suransuns (1999), figura 73, obra del ingeniero Jürg Conzett, es una estructura de tipo *banda tesa*, denominada *stressed ribbon* o también *stress-ribbon* en inglés. Cruza el rio Hinterrhein en el cañón Viamala, Suiza.
Su luz es de 40 m, con una relación global luz-flecha (flecha o canto general) de 40, bastante esbelta. El ancho libre es de 0,85 m, siendo las piezas de granito que forman el tablero de 60 mm × 250 mm × 1100 mm, es decir, de sólo 60 mm de espesor. Entre los bloques de granito, obtenidos de la cercana ciudad de Andeer, se intercalan bandas de aluminio de 3 mm de grosor. Se tesa a través de cuatro bandas de acero de 15 mm × 60 mm.
Se trata de estructuras funiculares pretensadas. Las bandas o cables inferiores se pretensan (se "tesan") contra el elemento que se apoya en ellas, hormigón armado por lo general, figuras 73 y 74. En este caso se pretensan, como se ha dicho, contra bloques de granito que forman el tablero de la pasarela.
Esta solución de pretensado, con esfuerzos de tracción y compresión, es la única forma de pretensar (sin contar ya con acciones exteriores de peso equilibradas con la tracción de la banda tesa), con dos elementos que tiene el mismo signo de curvatura, es decir, una curvatura sinclástica.
La barandilla encierra un detalle crucial, ya que los barrotes verticales hacen de atado entre banda tesa y piedra, lo que favorece muchísimo la estabilidad del conjunto al pretensar. El pretensado incrementa notablemente la rigidez de la estructura, que como se ha dicho tiene una esbeltez general de 40. El precio a pagar se encuentra en los anclajes al terreno de ambos arranques.
Es un tipo relativamente reciente, pero consolidado. Requiere un proyectista de gran destreza. En este caso, el uso de granito del lugar lo hace todavía más excepcional y lo integra en el sitio de forma brillante. La estructura no sólo es la protagonista, es un alarde estructural y, ante todo, una obra magnífica. Su trazado y ejecución va mucho más allá de la habilidad para analizar estructuras complejas.

Figura 75: Pirámide de acceso.
The entry pyramid.

Figura 76: Vista interior del emparrillado.
Interior view of the grid.

Figura 77: Detalle del emparrillado.
Detail of the grid.

La pirámide del Louvre

Figura 78: Ampliación del Louvre: vista interior cerca de la pirámide
Louvre expansion: interior view close to the pyramid.

The Louvre pyramid:
expertise and structural jewellery, at the service of the project concept.

The architect I. M. Pei was in charge of designing a new access and reception area for the Louvre Museum (1981). The structure is by the Canadian engineering company Nicolet Chartrand Knoll Ltd. The reception area is located under the existing patio, and a glass pyramid stands at ground level for access, figure 75, functioning as the "tip of the iceberg" of the new work. This logical operation is well done. The form chosen, a pyramid, is arbitrary, as often happens in architecture (Moneo, 2009).
The structure of the pyramid, which is 35 m along the sides and is 20.6 m tall, is in stainless steel and is divided into two basic elements: the first is composed of ribs that run along the sides, and the second, for the faces, is a grid, figure 76. Maritime technology is used at the joints, figure 77. This sophisticated execution was of crucial importance in the successful implementation of the project concept. This skilfully designed structure becomes a fundamental part of the project, even though this was not the reasoning behind it. We could say that the structure here plays a magnificent "supporting role".
The flooring next to the pyramid, figure 78, which spans about 60 m, is resolved using an ad hoc 2 m wide post-tautened grid, which is justified here by the exceptional nature of the work. This choice is a logical structural type as well as a design that supports the pyramid structure. The spiral staircase too is impeccably executed.

La pirámide del Louvre:
el buen oficio, orfebrería estructural, al servicio de la idea de proyecto.

El arquitecto I. M. Pei es el encargado de diseñar una nueva zona de acceso y recepción para el museo del Louvre (1981). La estructura es de la ingeniería canadiense Nicolet Chartrand Knoll Ltd. La recepción se sitúa bajo el patio existente, utilizando para su acceso, a nivel de rasante, una pirámide de vidrio, figura 75, que hace de "punta del iceberg" de la nueva obra. Es una operación lógica y bien hecha. La forma elegida, la pirámide, es arbitraria; como sucede a menudo en la arquitectura Moneo, 2009.
La estructura de la pirámide, de acero inoxidable, de 35 m de lado y 20, 6 m de altura, tiene dos órdenes básicos: el primero lo componen los nervios de las aristas, el segundo, para las caras, es un emparrillado, figura 76. En las uniones se usó tecnología naval, figura 77. Su sofisticada ejecución era crucial para que la idea de proyecto llegase a buen término.
El buen oficio en la estructura se convierte en parte fundamental del proyecto, a pesar de no haber sido aquella su idea generadora. Podríamos decir que la estructura realiza un magnífico "papel secundario".
El forjado próximo a la pirámide, figura 78, del orden de 60 m de luz, se resuelve con un emparrillado postesado de 2 m de canto, algo que aquí se justifica por lo excepcional de la obra. La elección es lógica como tipo estructural y como apoyo formal a la estructura de la pirámide. La escalera de caracol tiene también una ejecución impecable.

Figura 79: Iglesia de la Fuencisla, vista interior general.
Fuencisla Church, general interior view.

Figura 80: Vista en detalle de los casetones de cubierta.
Detailed view of the coffered ceiling.

Figura 81: Detalle de unión de los perfiles tubulares metálicos.
Detail of the joint between metal tubular sections.

La iglesia de la Fuencisla

**Fuencisla Church in Madrid:
a humble and magnificent generating pattern.**

The parish church of Nuestra Señora de la Fuencisla (1961-65), figure 79, is located in Poblado Dirigido de Almendrales, Usera, Madrid. It is the work of the architects José María García de Paredes, Alfonso Burón García, Mercedes de Miguel Sánchez and Antonio Ábalos Culebras.
The plan here is not the usual one for buildings of this type; it consists of 51 modules in an isotropic grid with a span of 4.2 m figures 79 and 80, defined by circular steel supports.
The light roof is composed of one coffered ceiling (a truncated pyramid) per module, with zenithal illumination. This can be very effectively resolved with another metal structure due to the large overall width and the small span of the panels. It is lined with acoustic panels of wood fibre painted white, which were commonly used at the time. They are not very costly and give a very noble finish. They were used very often by other very well-known architects at the time, such as De la Sota.
This church is located in what was a very lowly outlying quarter. Its design expresses this spirit, which was the reason for the selection of a grid with such small spans.
The details too, figure 81, are elemental and simple, and they are very well-designed in structural terms.
The structural and project approaches are totally interlinked. This church has more to do with the tradition of mosques than it does with Christian churches. Humble and yet simultaneously intense. What a great work!

**Iglesia de la Fuencisla, Madrid:
una humilde y magnífica trama generadora.**

La iglesia parroquial de Nuestra Señora de la Fuencisla (1961-65), figura 79, está situada en el Poblado Dirigido de Almendrales, Usera, Madrid. Es obra de los arquitectos José María García de Paredes, Alfonso Burón García, Mercedes de Miguel Sánchez y Antonio Ábalos Culebras.
El planteamiento no es el usual para este tipo; se trata de una malla isótropa de 4,2 m de módulo y 51 elementos, figuras 79 y 80, definida por soportes circulares de acero.
La cubierta, ligera, se forma con un casetón (una pirámide truncada) por módulo, con una iluminación cenital, que se puede resolver con otra estructura metálica de forma muy eficaz debido al gran canto global y a la reducida luz de los paños. Su interior se forra con paneles acústicos de fibra de madera pintados de blanco, un elemento constructivo muy usado en aquel momento, y que no siendo muy costoso proporciona un acabado muy noble. Otros arquitectos muy conocidos, como De la Sota, lo usaron muy a menudo en esa época.
La iglesia se sitúa en lo que era un barrio periférico muy humilde. Su diseño responde a ese espíritu, de ahí la elección de una trama con luces tan pequeñas.
Los detalles, figura 81, son también elementales y sencillos, y muy bien diseñados desde un punto de vista estructural.
Los planteamientos de la estructura y del proyecto están absolutamente ligados. Tiene más que ver con la tradición de las mezquitas que con las iglesias cristianas. Humilde y al mismo tiempo intensa. ¡Qué gran obra!

Figura 82: Las atarazanas, interior de una nave. *Shipyards, interior view of one of the modules.*

Figura 83: Vista en detalle del arco. *Detailed view of the arch.*

Las atarazanas de Barcelona

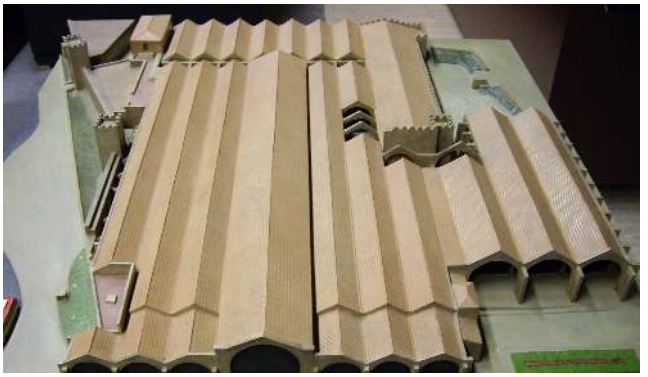


Figura 84: Las atarazanas de Barcelona, maqueta del conjunto.
Barcelona shipyards, model.

Barcelona shipyards:
industrial structures of enormous quality

Barcelona shipyards, figures 82 to 83, date from the 13th century, and they were expanded in the 18th century. Although they were mainly used for shipbuilding, they also had other uses, mainly military ones. I.e., these are what could now be termed "industrial premises".
The spans of the buildings correspond to the shipbuilding needs of the time, and some of the buildings were larger so that they could construct longer vessels.
The type of structure, figure 82, is very simple; it is based on rational and economic considerations. Nobody would have understood anything else at the time. The primary structure is composed of 6 m tall supports and stonework arches. The roof was lightened and constructed using wooden beams running along the building, with joists and ceramic tiles.
The main wooden beams rest on the stonework arches in grooves that realign them,figure 83. It should also be underlined that squareness here is not oriented perpendicular to the roof breadth but rather vertically. This is unusual. It is more rational, from a constructive viewpoint and with these roof angles, for the orientation to be perpendicular to the breadth.
In spite of this humble spirit, a space of enormous quality is created. It is used nowadays as a maritime museum, after renovation which preserved the basic nature of the work.
Rational constructions of this type, when they really are rational, usually give rise to an architecture that is more than worthy. This approach seems to have been forgotten by many modern architects, in spite of the fact that it is an essential part of the history of architecture.

Las atarazanas de Barcelona:
tramas industriales de enorme calidad

Las atarazanas de Barcelona, figuras 82 a 83, datan del siglo XIII, con ampliaciones del XVIII. Su destino principal era la construcción naval, con algún otro uso, sobre todo militar. Es decir, estamos ante lo que se podría llamar ahora una "nave industrial".
Las luces se corresponden a las necesidades de la construcción naval del momento, con alguna crujía más amplia para los barcos de mayor eslora.
El tipo estructural, figura 82, es muy sencillo; se hace desde un planteamiento básicamente racional y económico. Nadie entendería en aquel momento otra cosa. La estructura primaria se forma con soportes de 6 m de altura y arcos de fábrica de piedra. La cubierta se aligera y se forma con vigas de madera, en la dirección de la nave, rastreles y tejas cerámicas.
Las vigas de madera principales se apoyan sobre los arcos de fábrica coincidentes con canecillos que sirven de replanteo a la viguería, figura 83. Es además de destacar que la escuadría no se orienta perpendicular al paño de cubierta sino verticalmente. Esto no es usual. Es más lógico, desde el punto de vista constructivo, con estas pendientes de cubierta, la orientación perpendicular al paño.
A pesar de ese espíritu humilde, crea un espacio de enorme calidad, usado hoy día como museo marítimo gracias a una reforma que, en lo básico, conserva la obra.
Este tipo de construcciones racionales, cuando de verdad lo son, suelen producir una arquitectura más que digna, enfoque que parece haber sido olvidado por muchos arquitectos hoy día a pesar de ser parte esencial de la historia de la arquitectura.

Figura 85: Ayuntamiento de Säynätsalo, vista exterior.
Säynätsalo Town Hall, exterior view.

Figura 86: Vista del patio interior.
Courtyard view.

Ayuntamiento de Säynätsalo

Figura 87: Detalle de las cerchas.
Detail of the trusses

The Säynätsalo truss:
Basic structural patterns treated masterfully.

Säynätsalo Town Hall (1952), figure 85, is one of the finest works by Alvar Aalto. The structure is by the Swedish engineer Magnus Malmberg, as in other works by Aalto. It is arranged around a patio, figure 86, in an irregular volume, and it stands on sloping land in a way that is brilliantly resolved. This is a building in a small town in a forest.
The wooden roof trusses in the meeting hall, figure 87, are masterpieces.
The truss creates a cluster of struts which is highly efficient in structural terms. There are really two orders in this structure. The first order is composed of a vertical truss with a central post that is hidden by the struts around it; the second order consists of how these struts cut the span of the ceiling, which is small in itself. They obviously have a sculptural function which is similar to that of the large lights that appear in many spaces. And this "clutch" of struts is associated with the surrounding forest.
And it achieves this based on totally elemental and intuitive structural patterns. Once again we can ask ourselves: isn't this structural art? Of course it is.

Las cercha de Säynätsalo:
esquemas estructurales básicos tratados de forma magistral.

El Ayuntamiento de Säynätsalo (1952), figura 85, es una de las mejores obras de Alvar Aalto. La estructura la desarrolla el ingeniero sueco Magnus Malmberg, como en otras obras del arquitecto.
Se organiza en torno a un patio, figura 86, con un volumen irregular, y asentado en un cambio de cotas manejado de forma brillante. Es un edificio de una ciudad pequeña en medio del bosque.
Las cerchas de madera de la cubierta de la sala de plenos, figura 87, son una obra maestra.
La cercha crea un racimo de jabalcones de gran eficacia estructural. En realidad la estructura tiene dos órdenes. Hay un primer orden formado por una cercha en el plano vertical, con un montante central que queda camuflado entre los jabalcones perimetrales, y un segundo orden que forma esos jabalcones que van a cortar la luz del forjado, ya de por sí pequeña. Tienen obviamente una función escultural, como el de las grandes lámparas que aparecen en muchos espacios. Y ese "ramillete" de jabalcones está vinculado al bosque circundante.
Y lo hace partiendo de esquemas estructurales absolutamente elementales e intuitivos. Cabe preguntarse: ¿no es esto *structural art*? Por supuesto.

Figura 88: Vivienda en Muuratsalo, entreplanta. *Home in Muuratsalo, mezzanine.*

Figura 89: Patio de la vivienda. *Housing court.*

Vivienda en Muuratsalo

Figura 90: Vista exterior de la vivienda.
Exterior view of the house.

Aalto, Muuratsalo:
elemental patterns, masterful details.

The home by Alvar Aalto in Muuratsalo (1952) stands in a forest, close to a small lake, like many of the small homes in Finland. He designed it for himself. This is an L-shaped open-plan house with a patio, figures 89 and 90, with roofs that slope in different directions depending on which arm of the L they are one, and a small mezzanine for his workroom, figure 88.
This is a very humble home. All of its "luxury" stems, above all, from the detailed treatment of the patio facade. Critics of this work say that the varieties of bricks used here are because he used brick samples from other larger works he directed.
As normally occurs in homes, the structure is based on the arrangement of spaces and the design of the ground plan. Aalto uses, in this way, a system of supporting walls and wooden tie-beams. Everything is very logical and elemental. But there are small masterful details, such as the way the wall of the mezzanine hangs, figure 88. This is the only point which breaks with the logic of the structure, and it too could have used the tie-beams perpendicular to the load-bearing wall. But this breaks with the general rule to offer a brilliant solution to this small mezzanine wall ...
Great architecture made very simply. A structure handled with great expertise, structure that is completely imbued with the overall concept of the project. Small and very local masterful mannerist details.

Aalto, Muuratsalo:
esquemas elementales, detalles maestros.

La vivienda de Alvar Aalto en Muuratsalo (1952) está en medio de un bosque, y cerca de un pequeño lago, como están muchas de las pequeñas casas en Finlandia. La diseña para él. Es una casa patio en L de una sola crujía, figuras 89 y 90, y con una cubierta en pendiente, según la crujía, para acoger una pequeña entreplanta en la que sitúa su gabinete de trabajo, figura 88.
Es una vivienda muy humilde. Todo "el lujo" viene, sobre todo, del tratamiento de detalle de la fachada al patio. Las malas lenguas dicen que esa variedad de ladrillo viene derivada del aprovechamiento de muestras de otras obras más grandes que dirigía.
Como normalmente sucede en la vivienda, la estructura nace a partir de la organización de los espacios, del diseño de la planta. Aalto usa, de este modo, un sistema de muros de carga y viguetas de madera. Todo muy lógico y elemental. Pero hay pequeños detalles maestros, como la forma de colgar el forjado de la entreplanta, figura 88. Este es el único punto en el que rompe la lógica de la estructura, podría haber seguido usando las viguetas perpendiculares al muro de carga. Pero rompe la norma general para dar una solución brillante a ese pequeño forjado de entreplanta.
Arquitectura con mayúsculas hecha de forma muy sencilla. Una estructura manejada con muchísimo oficio que está totalmente imbricada con la idea general de proyecto. Pequeños detalles maestros manieristas muy localizados.

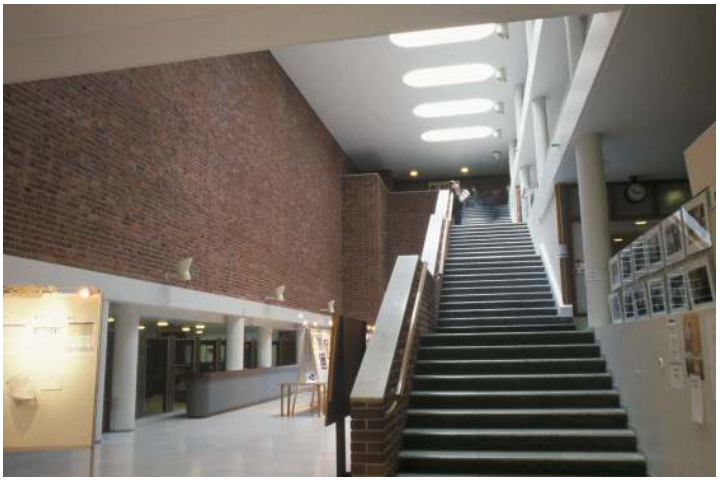


Figura 91: Universidad de Jyväskyla, vista del acceso.
Jyväskyla University, access view.

Figura 92: Vigas convexas.
Convex beams.

Figura 93: Salón de actos.
Assembly hall.

La Universidad de Jyväskyla

Figura 94: Vista general del edificio.
General view of the building.

Jyväskyla, Aalto:
Irregular work, brilliant ideas, expertise and highly debatable solutions.

Jyväskyla University (1951–71), figura 94, by Aalto, is a work that in my humble opinion is very irregular in terms of its quality.
In some parts the structure is handled classically and with great expertise, as can be seen in figure 91. The space is magnificent. The visible concrete structure fits the general design and even emphasises it.
In other places, such as the one shown in figure 92, a very well-known element, a reinforced concrete portico, is brilliantly distorted to create very personal forms while maintaining structural rationality. The concave shape of the reinforced concrete beams, in an area of positive moments, makes rational reinforcing possible; however, I doubt whether Aalto based his decision to create this distortion on this rationality, as a convex shape would have led to forms foreign to the modern movement. But the fact is that there is structural rationality within the distortion.

Jyväskyla, Aalto:
obra irregular, ideas brillantes, buen oficio y soluciones muy discutibles.

La Universidad de Jyväskyla (1951–71), figura 94, de Alvar Aalto, es una obra, en mi opinión, muy irregular en su calidad.
En algunas zonas la estructura se maneja de manera clásica y con gran oficio, como se puede ver en la figura 91. El espacio es magnífico. La estructura vista de hormigón acompaña al diseño general e incluso lo potencia.
En otros lugares, como muestra la figura 92, un tipo muy conocido, el pórtico de hormigón armado, se distorsiona ligeramente de forma brillante para obtener formas muy personales; y manteniendo la racionalidad de la estructura. La forma cóncava de las vigas de hormigón armado, en una zona de momentos positivos, permite un armado racional, aunque dudo que Aalto se apoyara en esa racionalidad para decidir esa distorsión, ya que la forma convexa le conduciríaa formas ajenas al movimiento moderno. Pero el hecho es que hay racionalidad estructural dentro de la distorsión.

Figura 95: Cerchas de la mensa. *Mensa trusses.*

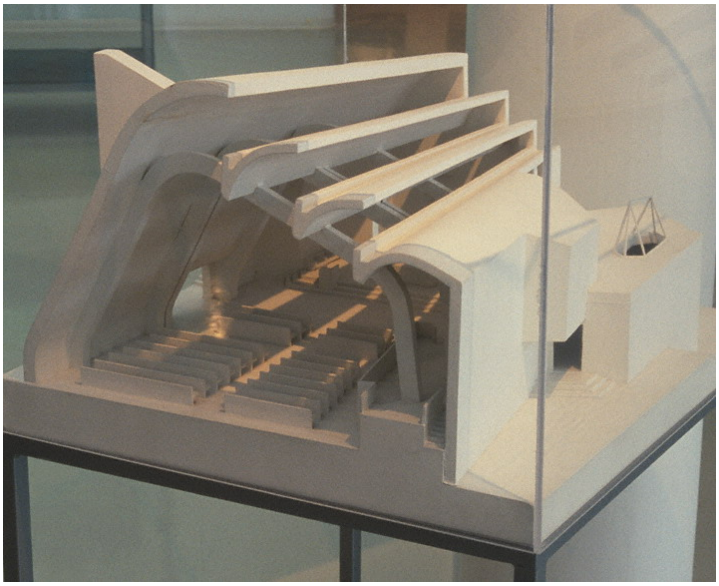


Figura 96: Maqueta del Mueso Aalto de Säynätsalo.
Model of the Aalto Museum, Säynätsalo.

Figura 97: Cerchas de la mensa.
Mensa trusses.

In some parts, such as the assembly hall, figure 93, it is possible to say that slackness is visible in the relationship between the structure and project. This is very unusual in Aalto. The beam edges emerge from the false ceiling as if they did so due to a mistake. In other places he uses far more brilliant solutions for similar problems, as is shown by a model of the Säynätsalo Aalto Museum, figure 96. There we can see the great Aalto, handling structure too, as brilliant as he is rational.
The wooden trusses of the mensa, figures 95 and 97, are the most interesting structural elements, although they are not of the same standard as those in Säynätsalo, which would be very hard to achieve, even for Aalto himself. Based on a classical type of wood, he changes the plane of the brace and creates an intermediate support between the trusses, introducing a special and original type of variation. A very interesting solution. Aalto, in general, handles structure in a very classical way, in the sense of balance, with great expertise above all, while in some designs he manages structure in connection with the project masterly.

Hay partes, como el salón de actos, figura 93, en donde se puede decir que hay una dejadez en la relación entre estructura y proyecto, nada usual en Aalto. Las vigas de canto sobresalen del falso techo como por descuido. Él tiene soluciones mucho más brillantes para problemas similares, como muestra una maqueta del Museo de Aalto de Säynätsalo, figura 96. Ahí sí vemos a un gran Aalto, también en el manejo de la estructura, tan brillante como racional.
Las cerchas de madera de la mensa, figuras 95 y 97, guardan el elemento estructural de más interés, aunque sin llegar a la altura de las de Säynätsalo, cosa nada fácil de conseguir, ni siquiera para el propio Aalto. Partiendo de un tipo clásico de madera, cambia de plano el jabalcón creando un apoyo intermedio entre cerchas, introduciendo una variación espacial del tipo original. Una solución muy interesante.
Aalto, en general, hace un uso muy clásico de la estructura, en el sentido de *equilibrado*, con mucho oficio ante todo, y con algunos diseños en donde se maneja la estructura, en relación al proyecto, de forma magistral.

Figura 98: Villa Mairea, vista exterior.
Villa Mairea, exterior view.

Figura 99: Soportes de la pérgola del jardín.
Supports at the garden pergola.

Figura 100: Pérgola del jardín.
Garden pergola.

Villa Mairea

Villa Mairea:
a modern palace with brilliant structural details.

Villa Mairea (1937-40), figure 98, is one of the masterpieces by Alvar Aalto. Sometimes an essential fact is forgotten, and it is that this work is an authentic modern palace, not a humble detached house like another work by Aalto, Muuratsalo, page 91.
The structure is not the protagonist here, as could be expected. But as is the case in other works by Aalto, his management of structure displays expertise and brilliant details.
The use of taped double metal pillars in the main hall, is better understood once the structure of the outdoor pergola that connects with the sauna has been seen. They are both shown in figure 99, and where wood and concrete are used. This detail therefore originates in wood and is reflected in the hall. This is a rhetorical use of beautiful structure that is consistent with the work as a whole.
In the pergola here, figure 100, he uses elements that are traditional in wooden structures together with other modern ones made of concrete and steel, and he does so in a way that is as self-assured as it is brilliant.
The ground floor staircase next to the hall, figures 101 to 103, is one of the most iconic pieces in Aalto's works.
Surely every architect knows this "forest of wooden rods", figure 101, and the shape of the carpeted wooden steps that is so particular. Nobody denies the beauty of these details, which definitively give the staircase true body.

Villa Mairea:
un palacio moderno con detalles estructurales brillantes.

La Villa Mairea (1937-40), figura 98, es una de la piezas maestras de Alvar Aalto. A veces se olvida un dato esencial, y es que esta obra es un auténtico palacio moderno, no una vivienda unifamiliar humilde como puede serlo, también de Aalto, Muuratsalo, página 91.
La estructura no es la protagonista, como cabría esperar. Pero sí destacam, como en otras obras de Aalto, no sólo oficio sino, también, detalles brillantes en el manejo de la estructura.
El uso de pilares metálicos doblados del salón principal, encintados, se entiende mejor cuando se ve la estructura de la pérgola exterior que conecta con la sauna, también mostrados en la figura 99, y en donde se utiliza la madera y el hormigón. Es, por tanto, un detalle que nace de la madera y que se refleja en el salón. Un manejo retórico de la estructura bello y al mismo tiempo coherente en el conjunto de la obra.
En esa pérgola, figura 100, usa elementos tradicionales de la construcción con madera combinados con otros modernos de hormigón y acero, y lo resuelve de forma tan desenfadada como brillante.
La escalera de planta baja, junto al salón, figuras 101 a 103, es una de la piezas más icónicas dentro de la obra de Aalto. Seguramente todo arquitecto tenga en mente, figura 101, ese "bosque de barrotes de madera" y la forma tan particular de los peldaños alfombrados de madera. Nadie discute la belleza de esos detalles, que en definitiva dan verdadero cuerpo a la escalera.

Figura 101: Detalles de la escalera principal. *Details of the main staircase.*

Figura 102: Detalles del apoyo de la escalera. *Details of the support of main staircase.*

Figura 103: Vista general de la escalera principal.
General view of the main staircase.

It is also highly probable that nobody knows how the main structure of this stair is made or what it is made of, figures 101 and 102: metal shapes. They are hidden by the "forest of rods" and some plants. But this solution is no less elegant, and it is also simple. A sign of expertise, even if it is not the crucial aspect of this staircase.
It is interesting to admit how partial memory is, and how elements that seem to be less important and decorative, eventually come to play memorable roles. The concrete structure of the walls is hidden by more appropriate claddings such as the wooden panels on the hall roof, figure 103. The structure is by no means the protagonist here, as could be expected in a building of this type. But once again, Aalto handles the structure in an exemplary manner as well as offering brilliant details.

También es muy probable que casi nadie sepa cómo y de qué está hecha la estructura principal de esta escalera, figuras 101 y 102: perfiles metálicos. El "bosque de barrotes" y algunas plantas lo ocultan. Pero es una solución no menos elegante, además de sencilla. Toda una muestra de oficio, a pesar de no ser lo crucial de esa escalera. Es curioso reconocer la parcialidad de los recuerdos, y cómo elementos aparentemente menores, decorativos, acaban tomando un protagonismo memorable.
La estructura de los forjados, de hormigón, queda oculta en acabados más apropiados como los paneles de madera del techo del salón, figura 103.
La estructura no es protagonista en absoluto, como cabría esperar en un edificio de este tipo. Pero, una vez más, Aalto la maneja de forma ejemplar, además de ofrecer detalles brillantes.

Figura 104: Capilla de Saint Benedict, vista exterior del acceso. *Saint Benedict's chapel, exterior view of the access.*

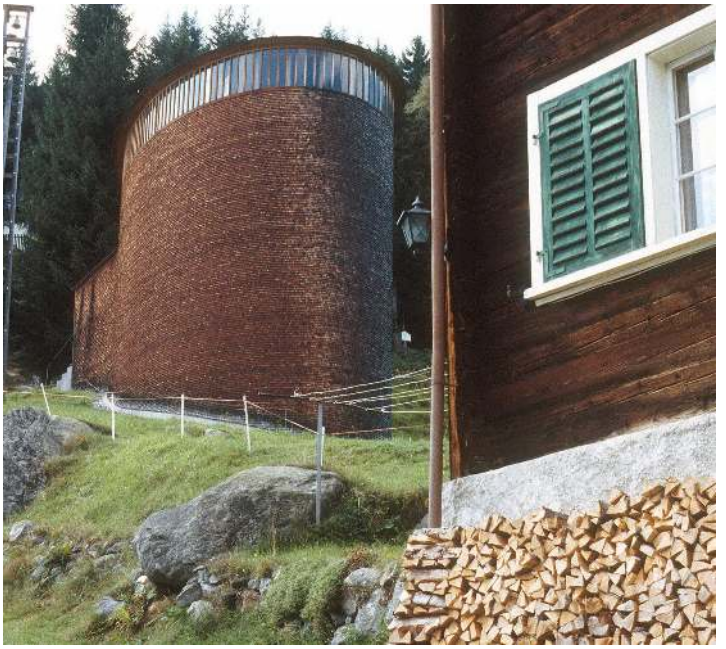


Figura 105: Vista exterior. *Exterior view.*

Capilla de Saint Benedict

**Saint Benedict's chapel:
modern wood technology, hidden and more like furniture than structural carpentry.**

Saint Benedict's chapel (1987-89), figures 104 to 105, located in the small town of Sumvitg, Switzerland, is the work of the architect Peter Zumthor.
All of the constructions in the region use wood for the structure and many other elements. It is not rare for "wooden tiles" to be used on the facade, as Zumthor does. Wood is also very suitable for the interior. However, Zumthor handles this structure of laminated wood in a way that is not traditional at all, and he also uses sophisticated technology that is not hard to find in Switzerland. The ground plan and most especially the roof structure are like a leaf from one of the surrounding trees. This image unites all of the other decisions.

**Capilla Saint Benedict:
moderna tecnología de la madera, oculta, más cercana al mueble que a la carpintería de armar**

La capilla de Saint Benedict (1987-89), figuras 104 a 105, situada en la pequeña ciudad de Sumvitg, Suiza, es obra del arquitecto Peter Zumthor.
Estos enclaves respiran madera en todas sus construcciones, en la estructura y en muchos otros elementos. No es infrecuente el uso de "tejas de madera" en la fachada, como hace Zumthor. Además, la madera es muy apropiada para su interior.
A partir de ahí, Zumthor maneja la estructura, de madera laminada, de una forma nada tradicional, usando además tecnología sofisticada que no le cuesta encontrar en Suiza. La planta, y la estructura de cubierta en especial, se asemejan a una hoja de uno de los árboles circundantes. Esa imagen va atando el resto de las decisiones.

Figura 106: Uso del nudo rígido en madera. *Use of a rigid wooden joint.*

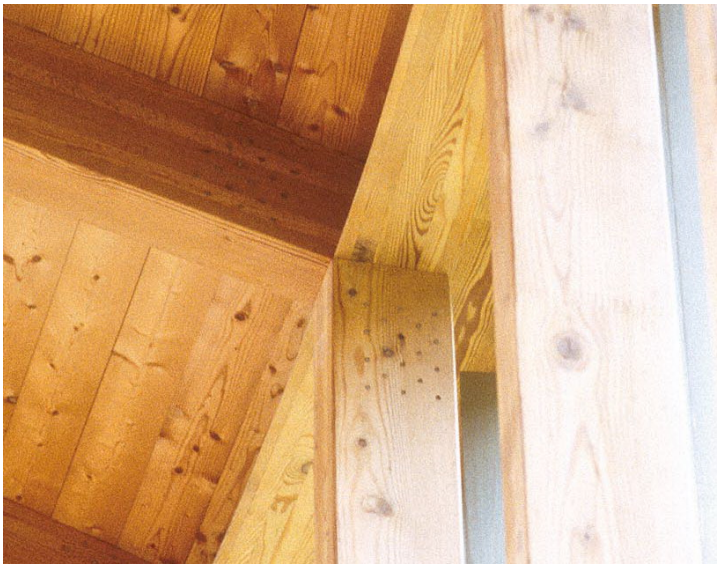


Figura 107: Uso del nudo rígido en madera.
Use of a rigid wooden joint.

Figura 108: Vista interior de la cubierta.
Interior view of the cover.

Zumthor is the son of a structural carpenter and businessman. He himself started work as a cabinetmaker, but his contact with New York finally led him to architecture. It is very clear in his works using wood that he dominates this material.
Moreover, in this work structure is handled more as a cabinetmaker would, rather than a structural carpenter or architect. And this seems to me to be a correct approach in cases such as this, where the building is close to being "urban furniture".
The trapezoid central beam, figure 106, is slightly arched to form a gabled roof. It is rigidly joined to the radial ribs by glued strips embedded between the sheets of laminated wood. There is another edge beam with a complex geometry along the perimeter of the roof that is connected semi-rigidly to the beam and support, in the last of which steel pins are used as well as the embedded strips. The technology of these joints is completely hidden.
These are complex details that it would not be recommendable to extrapolate to large structures. But there are occasions, like this one, in which they are more than appropriate.

Zumthor es hijo de un carpintero de armar y empresario. Él mismo comienza siendo ebanista, pero su contacto con Nueva York lo conduce finalmente a la arquitectura. En sus obras con madera se nota muchísimo que domina el material.
En esta obra, además, la estructura se maneja más como un ebanista que como un carpintero de armar o un arquitecto. Y me parece una postura correcta en casos como este, en los que el edificio está muy cercano a ser "mobiliario urbano".
La viga central, de sección trapezoidal, figura 106, y que está ligeramente arqueada para formar dos aguas, se une de forma rígida a los nervios radiales gracias a unas pletinas encoladas embutidas entre las láminas de la madera laminada. A lo largo del perímetro de la cubierta aparece otra viga de borde de geometría compleja que se une de forma semirrígida con viga y soporte, en ese último caso añadiendo clavijas de acero a las placas embutidas. La tecnología de la unión queda totalmente oculta.
Son detalles complejos que no es recomendable extrapolar a grandes estructuras. Pero hay ocasiones, como esta, en donde son más que apropiados.

Figura 109: Vista de los jardines desde uno de los pabellones. *View of the gardens from one of the pavilions.*

Palacio de Katsura

Figura 110: Monolitos usados como pasarelas.
Monoliths used as footbridges.

Katsura:
traditional "avant garde" architecture.

Katsura Palace (1615-1662), built in the Edo period (1603-1868), is located just outside Kyoto. It was a place where the Japanese Imperial Family would go to rest. Perhaps it is due to this that it is unclear whether the palace is not exactly inside the gardens around several pavilions, figure 109. Nature here has been dominated and brought under control, in an arrangement as strong as the one imposed by the pavilions themselves.
The garden contains small wood and stone footbridges, figures 110 and 112. These structural elements are designed in landscaping terms, as they had to be.
The German architect Bruno Taut (1880-1938) lived in Japan from 1933 to 1936. He was struck by the similarity between the architecture of Katsura and the modern movement, as may be seen clearly in figure 111. He was one of the people in Japan and abroad who realised how exceptional this work is.

Katsura:
arquitectura tradicional "de vanguardia".

El Palacio de Katsura (1615-1662), construido en el periodo Edo (1603-1868), está situado en las afueras de Kyoto. Era un lugar de retiro de la Familia Imperial de Japón. Quizás por eso no está claro si el palacio está precisamente en los jardines que rodean a diversos pabellones, figura 109. Es, además, una naturaleza dominada, bajo control, con un orden tan fuerte como el que se impone a los propios pabellones.
El jardín contiene pequeñas pasarelas de piedra y de madera, figuras 110 y 112. El diseño de estos elementos estructurales está hecho en términos paisajísticos, como no podía ser de otro modo.
El arquitecto alemán Bruno Taut (1880-1938) residió en Japón de 1933 a 1936. Quedó impactado de la proximidad entre la arquitectura de Katsura y el movimiento moderno, como se puede apreciar claramente en la figura 111. Fue una de las personas que, dentro y fuera del Japón, hicieron ver la excepcionalidad de esta obra.

Figura 111: Vista exterior del pabellón principal. *Exterior view of the main pavilion.*

Figura 112: Pequeña pasarela de madera.
Small wooden footbridge.

Gropius y Le Corbusier fueron también grandes admiradores de Katsura. Y no es de extrañar, sobre todo en el caso del segundo, ya que el uso del tatami como módulo sintoniza plenamiente con su *modulor*. La estructura del cuerpo principal de la *Maison de l'Homme* de Le Corbusier, página 45, tiene mucho que ver con lo hecho en Katsura. Aquí, la estructura de madera, modulada por los tatamis, crea también una retícula espacial que forma parte del orden estricto que existe en los jardines y los pabellones.
Las puertas se convierten en paneles móviles, figura 114, que permiten cambiar la distribución de la planta; idea que también está presente en la arquitectura del movimiento moderno, como en la casa diseñada por el arquitecto G. Rietveld para la señora Truus Schröder en 1924, convertida en manifiesto del grupo holandés De Stijl.
El tramo de partición sobre la puerta es fijo, colaborando en la formación de un sistema porticado. Los nudos de la estructura de madera no permiten más que pequeños esfuerzos de flexión, son prácticamente articulaciones. La colaboración de las particiones es fundamental.

Gropius and Le Corbusier greatly admired Katsura too. And that is not odd, above all for the latter, as the use of the tatami as a module was completely in tune with his *modulor*. The *Maison de l'Homme* by Le Corbusier, page 45, uses structure in its main body in much the same way it is used in Katsura. Here, the wooden structure modulated by the tatamis also creates a spatial grid that forms a part of the strict order in the gardens and pavilions.
The doors are also mobile panels, figura 114, that make it possible to change the distribution of the floor plan; this idea is also present in modern movement architecture, such as the house designed by the architect G. Rietveld for Mrs. Truus Schröder en 1924, which became the manifesto of the Dutch group De Stijl.
The section of partition over the door is fixed and is a part of a portico system. The joints in the wooden structure only permit small flexion forces and are practically articulations. The partitions play a fundamental role here.

Figura 113: Bajocubierta vista del templo Daitokuji, Kyoto. *Roof frame of Daitokuji temple, Kyoto.*

Figura 114: Puertas que funcionan como particiones móviles.
Doors which function as mobile partitions.

Traditional Japanese architecture, like Chinese architecture to which it is related, does not use triangulation in structures. It is unclear whether this is due to lack of knowledge or a cultural tradition. Thus sloping roofs are created by adding "risers" on the beams under the roof, as shown in figure 113, in Daitokuji temple, and never by using strong frames in the Western way.
Katsura is an example of the most exquisite traditional architecture, with surprisingly modern values.
As in all traditional solutions, the structure here is an integral part of the project. Here it also plays a very important role, although it does so without standing out. The final aim, the display, is the quality of the spaces obtained and their relationship with the natural world around them. This is a lesson in architecture, and a lesson in handling structure well. Is this *structural art*? Most definitely.

La arquitectura tradicional japonesa, al igual que la china, con la que está emparentada, no usa la triangulación en la estructura, no está claro si por desconocimiento o por tradición cultural. Así, las pendientes de las cubiertas se hacen añadiendo "alzas" sobre las vigas de bajocubierta, como por ejemplo se muestra en la figura 113, del templo Daitokuji, nunca por armaduras resistentes al modo occidental.
Katsura es ejemplo de la más exquisita arquitectura tradicional, con valores sorprendentemente modernos.
Como en cualquier solución tradicional, la estructura es parte integral del proyecto, en este caso además con un papel muy relevante, pero sin protagonismos. El objetivo final, el alarde, está en la calidad de los espacios obtenidos y su relación con la naturaleza circundante. Es una lección de arquitectura, y una lección del buen manejo de la estructura. ¿Es esto *Structural Art*? Con mayúsculas.

Figura 115: Kulturhuset, Estocolmo, vista del exterior.
Kulturhuset, Stockholm, exterior view.

Figura 116: Vista interior.
Interior view.

Figura 117: Detalle de la estructura tipo.
Detail of the standard structure.

Casa de Cultura de Estocolmo

Kulturhuset:
a large container open to a square.

The architect Peter Celsing designed the House of Culture (1966-74) in the Sergels Torg Complex, Stockholm, figure 115.
This building occupies one side of the square, which is almost 10 m below ground level. It is completely open to the square through a glass facade composed of horizontal strips. The rear of the building has no openings at all. This project started off as a museum, but eventually became a multipurpose public building, with a theatre and exhibition hall.
It is a very modern project for its time, and the low-lying square was an additional difficulty.
It may be the initial change of plan for its use which led to the design of such a flexible structure. The building is conceived as a large container that can be used for a wide range of purposes, as the space inside it is free of supports, which are all at the front and rear facades, figures 116 and 117.
The structure is resolved into two orders, figure 117: there are main beams that span the whole space and which are therefore perpendicular to the facade, supporting large joists. Everything is very simple and logical. And it needs nothing more than space for the beam edges.
But what is necessary, above all, is the will to make things as simple and logical as possible, so that these edges are accepted naturally. It is not by chance that the structure here is left visible, even when it does not look especially attractive.

Kulturhuset:
un gran contenedor abierto a una plaza

El arquitecto Peter Celsing diseña la Casa de la Cultura (1966-74) del complejo Sergels Torg de Estocolmo, figura 115.
El edificio cierra uno de los lados de la plaza, hundida casi 10 m, a la que se abre completamente con una fachada acristalada en bandas horizontales. La trasera es completamente ciega. El proyecto, que arrancó para ser museo, acabó convertido en un edificio público multiusos: teatro y sala de exposiciones.
Es un proyecto de una gran modernidad para la época. La baja cota de la plaza introducía una dificultad adicional. El giro inicial en el uso quizás llevara a un planteamiento de la estructura tan flexible. El edificio se concibe como un gran contenedor que podría admitir multitud de usos, ya que se libera la crujía de soportes, llevados a la fachada delantera y trasera, figuras 116 y 117.
La estructura se resuelve con dos órdenes, figura 117: unas vigas principales que salvan toda la crujía, perpendiculares, por tanto, a la fachada, sobre las que apoyan el segundo orden formado por grandes jácenas. Todo muy sencillo y lógico. Y que no necesita más que espacio para los cantos de las vigas.
Pero lo que hace falta, sobre todo, es la voluntad para hacer las cosas de forma tan sencilla y lógica, admitiendo, así, esos cantos con naturalidad. Que la estructura quede vista no es casualidad, aún sin mostrar una imagen especialmente atractiva.

Figura 118: Centro de Prensa y Difusión Shizuoka, Tokyo. *Shizuoka Press and Diffusion Centre, Tokyo.*

Centro de Prensa y Difusión Shizuoka

Shizuoka Press and Diffusion Centre: Metaphors for a corner.

Shizuoka Press and Diffusion Centre (1967), Tokyo, figure 118, is the work of the architect Kenzo Tange. This is a corner building with a minute floor area of 189 m2 and which nevertheless is one of the key works of this architect.
A single cylinder with a diameter of 7.7 m and a height of 57 m contains a staircase, two lifts and one bathroom, together with a small kitchen on each floor. This gives access to the offices, which are understood in the project to consist of prefabricated modules that can be added or removed from the core. They project outwards 3.5 m at the corner, which is resolved using edge beams at the perimeter. As could be expected, the modules have not been changed.
Although here the structure generates nothing, it easily adapts to the project concepts. It does so in terms of the cylinder's dimensions, making it a large structural tube, as well as the large edges of the projecting beams. These are decisions reached with great mastery.
This is author architecture, and it also has a strong temporal charge. Some people believe this project recalls the proposals of the metabolists. I believe this similarity to be very circumstantial. The small scale of this project expresses something very different. Above all, what Tange has resolved masterfully is the traditional problem of a corner building: how to finish off a block in a way that is beautiful, joyful and imaginative.
These solutions and strategies could not be used in general. However, this does not mean that this is not a great work of architecture. Kenzo always managed structure with great skill and respect, using it and not negating it.

Centro de Prensa y Difusión Shizuoka: metáforas para una esquina.

El Centro de Prensa y Difusión Shizuoka (1967), Tokyo, figura 118, es obra del arquitecto Kenzo Tange. Se trata de un edificio en esquina con una planta minúscula, 189 m^2, y que sin embargo es una de las obras claves de este arquitecto.
Un cilindro, de 7,7 m de diámetro y 57 m de altura, contiene escalera, dos ascensores, un aseo y una pequeña cocina por planta. De ahí se accede a las oficinas, entendidas en proyecto como módulos prefabricados que podrían ir añadiéndose o quitándose del núcleo. En la esquina, el voladizo tiene 3,5 m, y se resuelve con vigas de canto en los lados.
Como cabría esperar, el estado de los módulos no se modificó.
La estructura no es generadora de nada, pero se adapta fácilmente a las ideas de proyecto, tanto por las dimensiones del cilindro, que se convierte en un gran tubo estructural, como por los grandes cantos de las vigas en voladizo. Son decisiones tomadas con mucho oficio.
Es una arquitectura de autor, y además con un fuerte acento temporal. El proyecto recuerda, para algunos, a propuestas de los *metabolistas*. En mi opinión, ese parecido es muy circunstancial. La escala reducida del proyecto habla de algo muy distinto. Por encima de todo, lo que Tange ha resuelto magistralmente es el problema tradicional del edificio en esquina: remata la manzana de forma bella, alegre e imaginativa.
No son soluciones ni estrategias generalizables. Lo que no quita para que se haya hecho una gran pieza de arquitectura.
Kenzo siempre manejó la estructura con gran habilidad y respeto, sacando partido de ella, no negándola.

Figura 119: Gimnasio Yoyogi, edificio principal.
Yoyogi Gymnasium, main building.

Figura 120: Acceso al edificio principal.
The access to the main building.

Figura 121: Detalle de articulaciones esféricas.
Detail of spherical joints.

Gimnasio Nacional Yoyogi

Yoyogi gymnasium:
a formidable tensile roof rooted in Japanese culture.

Yoyogi gymnasium was built for the Tokyo Olympic Games in 1964. It is by the architect Kenzo Tange and the engineers Yoshikatsu Tsuboi, who was the lead engineer, and a young Mamoru Kawaguchi; three great masters. It is composed of two buildings with tensile roofs, of which the one with the longest span is the most brilliant, figure 119. The floor plan and most particularly the way the wide access areas are organised, figure 120, are at the source of its volume.
The main span between supports is 126 m long, a record in buildings at the time. It is also avant garde in terms of its design. The date of construction has to be underlined, as it is earlier than the tensile roofs of Munich, which were finished in 1972.
The design of tensile structure is somewhat simpler than that of Munich, and it is also less transparent in all senses. Kenzo uses a non–funicular roof geometry for which a whole family of elements was required. Those which attach to the main cables are not themselves cables, but rather reinforced steel sections subjected to flexion and traction.
Figure 121 shows how these reinforced sections are attached to the main cables, with spherical joints that permit large movements. This detail, which was created ad hoc, is as carefully created as if it were sculpture.
A mathematical model was used for analysis. It was based on the membrane differential equation with added flexions, given that the surface is not funicular. But the role of physical models was still crucial here, more so than in Munich.

El gimnasio Yoyogi:
una formidable cubierta tensada enraizada en la cultura japonesa.

El Gimnasio Nacional de Yoyogi se construyó para las olimpiadas de Tokio de 1964. Es obra del arquitecto Kenzo Tange y los ingenieros Yoshikatsu Tsuboi, como líder, y un joven Mamoru Kawaguchi: tres grandes maestros. Se compone de dos edificios con cubiertas tensadas, siendo el de mayor luz el más brillante, figura 119.
La planta y, en concreto, la forma de organizar los amplios accesos, figura 120, están en la génesis del volumen.
La luz principal entre soportes es de 126 m; fue record en edificación. Formalmente es también vanguardista. Hay que remarcar la fecha; la obra es anterior a las cubiertas tensadas de Munich, acabadas en 1972.
El diseño de la estructura tensada es algo más simple que en Munich, y menos transparente en todos los sentidos. Kenzo impone una geometría de la cubierta que no es funicular, para lo que hará falta que toda una familia de elementos, los que atacan a los cables principales, no sean cables sino perfiles de acero armados sometidos a flexo-tracción.
La figura 121 muestra la unión de esos perfiles armados con los tirantes principales, con articulaciones esféricas para permitir los grandes movimientos. El detalle, desarrollado *ad hoc*, está cuidado como si fuese una escultura.
Para el análisis se usó un modelo matemático, partiendo de la ecuación diferencial de membrana, a la que se añaden flexiones; ya que, como se ha dicho, la superficie no es funicular. Pero el papel de los modelos físicos fue todavía crucial, más que en Munich.

Figura 122: Vista interior del edificio principal.
Interior view of the main building.

Figura 123: Portal de acceso del templo Daitokuji de Kyoto.
The door into the Daitokuji temple in Kyoto.

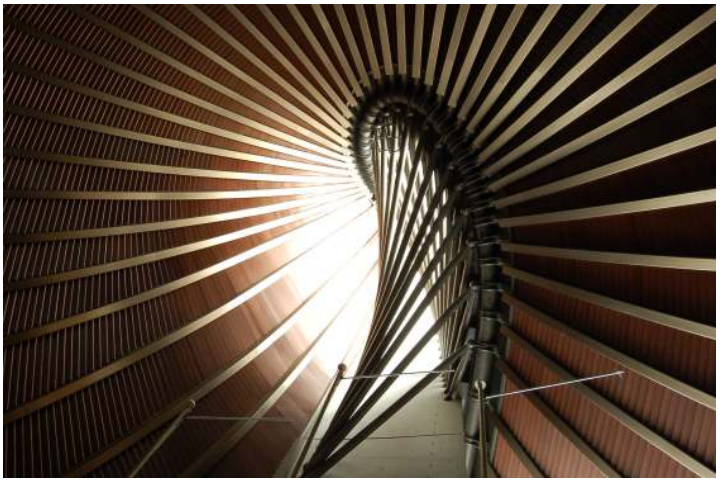


Figura 124: Vista interior del gimnasio pequeño.
Interior view of the smaller gymnasium.

Los cables principales se van abriendo hacia el centro para conseguir iluminación cenital, figura 122. Todo el despiece del falso techo es magnífico. En ese interior se aprecia el fuerte cambio de las curvaturas.
En mi opinión, el diseño está totalmente enraizado en la cultura japonesa. El hecho de forzar las curvaturas a costa de flexiones, aumentando el costo, tiene ahí su justificación.
En la figura 123 se muestra un portal de acceso del templo Daitokuji de Kyoto. La geometría de la cubierta es sorprendente. A mí me recuerda al casco de un samurái. Creo que en el diseño del Yoyogi hay un recuerdo de esa iconografía, un enlace con la memoria colectiva del pueblo japonés.
El edifico menor, figura 124, tiene un solo mástil y una cubierta también tensada; y siendo interesante no es tan limpio y potente como el otro.
Es curioso comparar este edificio con el estadio olímpico de Munich (página 63), otra obra tensada singular. En Munich no hay enlace alguno con la arquitectura tradicional o la memoria colectiva. En esta sí. Munich es una obra donde la estructura tiene mucho más protagonismo. Aquí, jugando un papel relevante, la estructura está muy condicionada por los planteamientos del proyecto de arquitectura.
Ambas son grandes obras. Comparándolas se puede comprobar, una vez más, que la estructura no se puede diseñar de forma autónoma. Pertenece a un todo, y solo ahí cobra su verdadero sentido.
Y, por supuesto, son obras donde el dominio de la técnica es imprescindible, donde la técnica es parte integral del proyecto de arquitectura.

The main cables open outward towards the centre to provide overhead illumination, figure 122. The whole breakdown of the false ceiling is magnificent, and the major change in the curvatures is visible within this interior.
I believe this design to be completely rooted in Japanese culture. The fact that curvatures are forced into existence at the cost of flexion forces increases the cost, but it is justified by this basis.
Figure 123 shows an access door to the Daitokuji temple in Kyoto. This roof geometry is surprising, and it reminds me of a Samurai's helmet. I think that the design of Yoyogi contains a memory of that iconography, a link to the collective memory of the Japanese people.
The smaller building, figure 124, has a single mast and tensile roof, and although it is interesting, it is not as clean and powerful as the other one.
It is interesting to compare this work with Munich Olympic stadium (page 63), another singular tensile work. In Munich there is no connection at all with traditional architecture or collective memory, while here there is. In Munich structure plays a far more central role. Here, although the structure is relevant, it is very much dominated by the approach taken in the architectural project.
Both projects are great works. When comparing them it becomes clear once again that structure cannot be designed independently. It is a part of the whole, and only as such does it take on its true meaning. And of course, these are works in which technical domination is absolutely necessary, as the technique used is an integral part of the architectural project.

Figura 125: Vista aérea. *Aereal view.*

Figura 126: Vista del interior de la gran sala. *Interior view ot the great hall.*

Palacio de Congresos de Salamanca

Salamanca Conference Centre: the play of gravity and light.

Salamanca Conference Centre (1986-1990), figure 125, is by the architect Juan Navarro Baldeweg and the engineer Julio Martínez Calzón. The main hall can hold 1,300 people while the dome over it is one of the most important features of the project.
Juan Navarro was awarded this project in a competition. One of its greatest virtues is how it fits into the urban landscape, as the building forms one of the edges of the city that best characterise it. The design of its dome is also undoubtedly one of its main attractions. It was important that this initial idea was not lost in execution.
Juan Navarro himself says that three themes keep recurring in his work: gravity, light and skill. These themes are present not only in his architectural works, as they also arise in his graphic works and sculptures.
His work with gravity in his sculpture is of great interest for specialists in structure, in the same way as the works of Alexander Calder, for example. It expresses points of view that are very simulating for architectural works, in which the spans used tend to be small or moderate.
The roof in this work, as it the case in other roofs by him, unites two of his major themes, *gravity* and *light*, figure 126. It has been said to resemble the work by John Soane in his London house which is now a museum (`http://www.soane.org/`) where he designed segmented domes as canopies which filter and reroute the light, creating very high quality spaces. This reference is surely inevitable.
However, this is on a completely different scale. While Soane designed small rooms, here there is a 30 m square floor plan, giving rise to a structural problem of a certain complexity.

Palacio de Congresos de Salamanca: el juego de la gravedad y la luz.

El arquitecto Juan Navarro Baldeweg ganó el concurso para realizar El Palacio de Congresos de Salamanca (1986-90), figura 125, y en la redacción del proyecto colaboró el ingeniero Julio Martínez Calzón. La sala principal tiene capacidad para 1300 personas y la cúpula que la cubre es uno de los rasgos más importantes del proyecto.
Una de las mejores virtudes del proyecto era su inserción en el paisaje urbano, ya que el edificio está en uno de los bordes de la ciudad que mejor la caracterizan. El diseño de la cúpula fue, sin duda, otra de sus grandes bazas. Era importante que su ejecución no perdiese la idea inicial.
Juan Navarro, según sus mismas palabras, tiene tres temas recurrentes: la *gravedad*, la *luz* y la *mano*. Estos temas están presentes no sólo en su obra arquitectónica sino también en su obra gráfica y escultórica. Su trabajo con la *gravedad*, en escultura, tiene mucho interés para el especialista en estructuras, al igual que por ejemplo la obra de Alexander Calder. Son puntos de vista que resultan muy estimulantes para obras de arquitectura, donde las luces suelen ser pequeñas o moderadas.
En esta obra, al igual que en otras de sus cubiertas, une los dos primeros temas, la *gravedad* y la *luz*, figura 126. Algunos escritos han señalado el parecido con lo hecho por John Soane en su casa de Londres, ahora museo (`http://www.soane.org/`), en donde diseña unas cúpulas baídas a modo de baldaquinos que filtran y reconducen la luz creando unos espacios de gran calidad. La referencia es seguramente inevitable.
No obstante, el tamaño es completamente distinto. En el caso de Soane son pequeñas habitaciones, y en este caso se trata de un espacio de planta cuadrada de 30 m de lado. Esto implica un problema estructural de cierta complejidad.

Figura 127: Estructura de la cúpula ya izada. *The dome structure raised.*

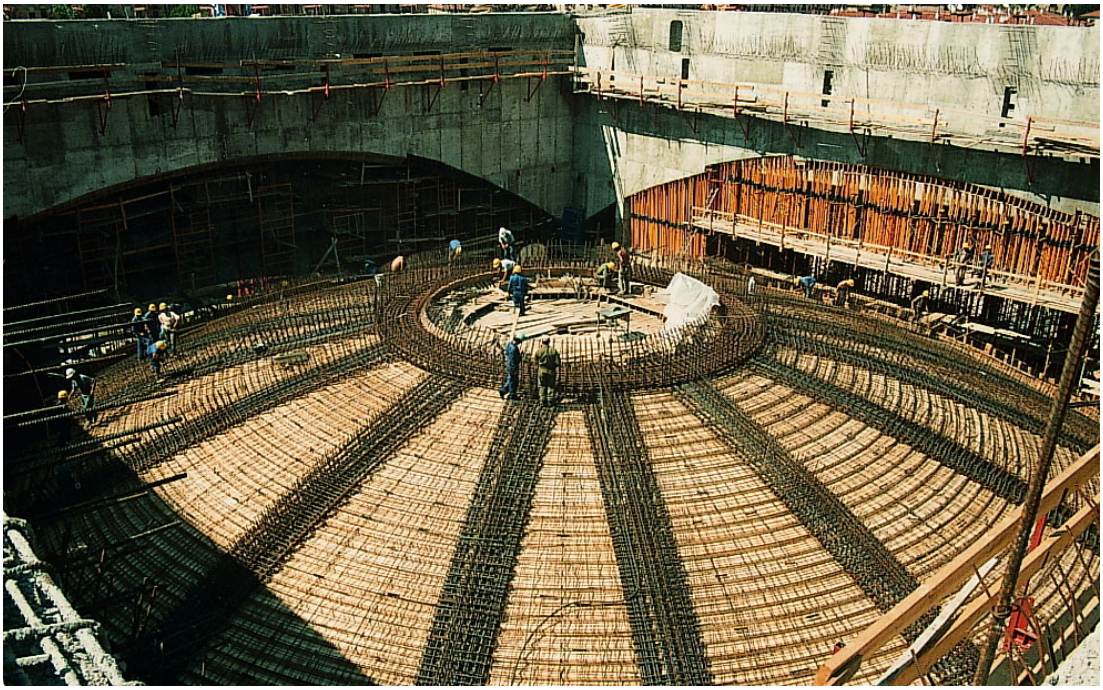


Figura 128: Construcción de la cúpula antes del izado. *Constructing the dome before raising it.*

The first challenge here is for the structure to fit the architectural design, and this is achieved. The lateral illumination is quite open, and this tends to create a feeling of weightlessness in the dome, figure 126. This effect is far stronger here, due to the great weight of this structure, 1,400 tonnes, figure 127.
The second challenge was to imbue the competition concept with structural logic. To do this he decided to use a hybrid type of reinforced concrete. The basic idea is to have a total of 16 radial beams plus the ring around the central 9 m diameter opening. This is a well-known pattern. It means that only the ends of the said beams are visible in the illuminated bands around the perimeter.
As may be expected, the beams do not enter the corners, figure 128, thereby adhering to the competition concept. As this type of support leads to strong flexion forces, no membrane or shell could be used, as is the case in many domes. This is the price to pay for sticking to the competition concept.
The interior dome hangs from the beams. This makes it possible for another layer to be at the same level as the ribs, finally forming a structure in two layers across the whole surface of the dome. These layers are from 1.5 m to 5 m apart. The lower slab consists of 10 cm thick reinforced concrete, while the top one has a frame of pre-tensed beams and a 15 cm thick ceramic vault. The exterior perimeter between the two layers is enclosed by a concrete wall.
The structure was erected on the floor of the hall before being raised into its definitive position, Figure 1.118, by 16 jacks, one at the end of each one of the 16 radial beams. This is more than reasonable, especially when the complexity of shuttering the visible lower layers is seen. During the raising of the finished structure the predominance of flexion forces in the structural pattern was made clear.
This situation is one that very often occurs in architecture: the attempt is made to adapt the structure to the draft architectural project, and the challenge here is for it to do so in a structural coherent way. Whether it will be possible to do so, or to do so without making major changes, will depend on each case, as well of course on the skill of the structural architect, Julio Martínez Calzón in this case, who displayed a very high level of expertise here. This work is also of interest as it shows how art, architecture and engineering all feed back into each other. This is not viable, at least so clearly and directly, in large-scale works, although it normally is in building structures.

El primer reto es que la estructura se imbrique con el diseño de arquitectura, cosa que se consigue. La iluminación lateral queda bastante diáfana, y tiende a crear un efecto de ingravidez en la cúpula, figura 126, efecto mucho más potente ahora al tratarse de una estructura de gran peso, 1.400 toneladas, figura 127.
El segundo reto es dotar de lógica estructural a la idea del concurso. Para ello se opta por un tipo híbrido de hormigón armado. La idea básica es la de disponer un total de 16 vigas radiales más el anillo perimetral del óculo central de 9 m de diámetro. Este esquema es bien conocido. Ello permite que, en las bandas perimetrales iluminadas, sólo aparezcan los arranques de dichas vigas, que como era de esperar huyen de las esquinas, figura 128, y que por tanto se mantenga la idea del concurso. Esta forma de apoyo introduce fuertes esfuerzos de flexión, haciendo inviable un planteamiento de membrana o lámina, como es el caso de muchas cúpulas. Es el precio a pagar por mantener la idea de proyecto.
La cúpula interior se cuelga de las vigas, lo que da pie para disponer otra capa enrasada con la parte superior de los nervios, formando, finalmente, en toda la superficie de la cúpula, una estructura de doble capa. Las dos capas se sitúan a distancias de 4,5 m a 5 m. La losa inferior es de hormigón armado con un espesor medio de 10 cm y la capa superior es un forjado de vigueta pretensada y bovedilla cerámica de 15 cm de espesor. El perímetro exterior, de capa a capa, se cierra con otro muro de hormigón.
La estructura se montó a nivel de piso de la sala y se izó hasta su posición definitiva, tirando con 16 gatos del extremo de las 16 vigas radiales. Algo más que razonable, en especial si se observa la complejidad de encofrar la capa que queda vista al interior. En el izado, con la estructura acabada, queda de manifiesto el predominio de flexiones en el esquema estructural.
Estamos, por tanto, ante una situación muy frecuente en arquitectura: la estructura intenta adaptarse a la idea inicial del anteproyecto de arquitectura con el reto de que, finalmente, lo hecho tenga coherencia estructural. El poder conseguirlo, o el hacerlo sin grandes cambios, dependerá de cada caso. Y, por supuesto, de la habilidad del proyectista de la estructura, Julio Martínez Calzón en este caso, que ha mostrado un gran oficio.
Es una obra que tiene también interés por mostrar cómo se suelen retroalimentar artes, arquitectura e ingeniería. Esto no es viable, al menos de forma tan clara y directa, en los grandes tamaños. Pero sí lo es, normalmente, en el ámbito de las estructuras de edificación.

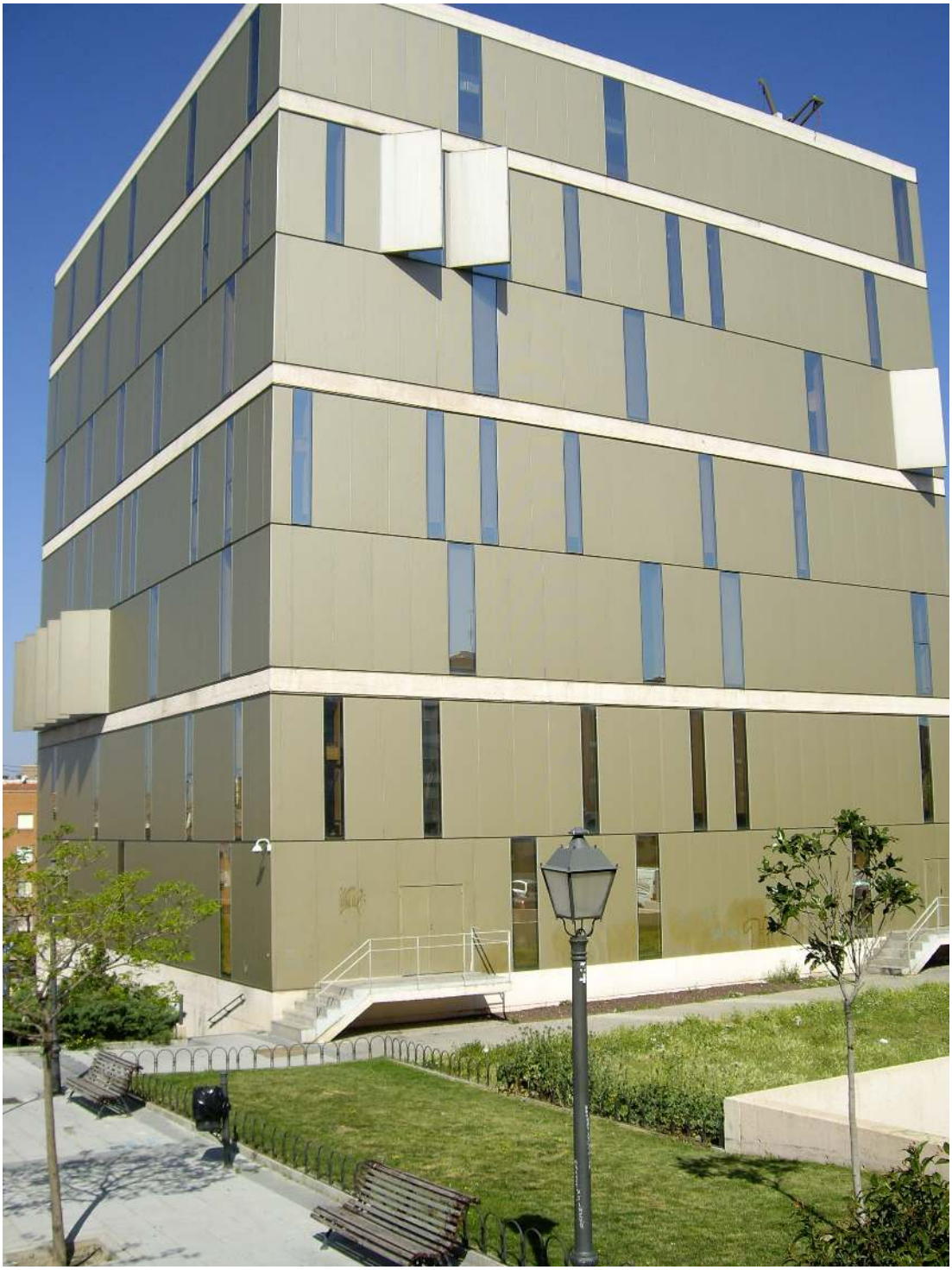


Figura 129: Biblioteca Municipal de Usera. *Usera municipal library.*

Biblioteca municipal de Usera

**Usera municipal library:
a slab *ad hoc* included in the project.**

Usera municipal library (2002), in Madrid, figure 129, is by the architects Iñaki Abalos and Juan Herreros. The building is a clean 6–story prism with a square base, standing 28 m tall and measuring 22.8 m along the sides. Its walls consist of a metal sandwich panels in horizontal bands, creating a very noble skin. Its urban setting strongly influenced this project, and the compact nature of the buildings makes it functional.

The facade is light, and between its sandwich panels and the inner wall of cardboard and plaster there are metal supports about 4 m apart, except for at the corners. This is a logical decision.

The square floor plan has a very open arrangement, as the stairs, lifts and washrooms are all contained in one corner, figure 131. It is reasonable for there to be a support in this area, and one was put into place, so that there is a maximum span of 14.4 m × 14.4 m, with lateral bands measuring 8.4 m.

The roof is an ad hoc bidirectional "hollow" slab about 60 cm thick. The finish of this slab is visible. One of the roof reinforcing beams has been camouflaged as a protective wall, figure 130.

More interior supports could have been added to reduce the spans. However, 14.4 m is a highly functional span with a very acceptable cost, and as it stands the structure completely supports the arrangement of the floor plan. The structure supports the clean architecture, and the slight extra cost of the *ad hoc* slab is more than justified.

**La biblioteca municipal de Usera:
una losa *ad hoc* integrada en el proyecto.**

La biblioteca municipal de Usera (2002) en Madrid, figura 129, es obra de los arquitectos Iñaki Ábalos y Juan Herreros. El edificio es un prisma limpio de 6 plantas y base cuadrada, con 28 m de altura y 22,8 m de lado. Un cerramiento de panel sandwich metálico, organizado en bandas horizontales, crea una piel muy noble. El contexto urbano ha pesado mucho en el proyecto. La compacidad del edificio favorece su funcionalidad.

En la fachada ligera, entre los paneles sandwich y un trasdosado de cartón-yeso, empapelado *ad hoc*, se embeben soportes metálicos a unos 4 m de separación, evitando las esquinas, cosa bastante razonable. La planta cuadrada queda organizada también con mucha limpieza al disponer en una esquina, figura 131, de forma razonable, escalera, ascensores y aseos. Lo razonable era disponer un soporte en esa zona, y así se hizo, de modo que se crea una luz máxima de 14,4 m × 14,4 m, con bandas laterales de 8,4 m.

El forjado es una placa bidireccional "hueca", de unos 60 cm de grosor. El acabado de la placa queda visto. Una de las vigas de refuerzo del forjado se camufla formando un peto, figura 130.

Se podría haber añadido más soportes interiores y reducir las luces. Pero 14, 4 m es una luz de gran funcionalidad y muy asumible en el coste. Y, de este modo, la estructura apoya totalmente la organización en planta, y la estructura apoya la limpieza de la arquitectura. El pequeño sobrecoste de la placa está más que justificado.

Figura 130: Viga formando un peto. *Beam that forms a protective wall.*

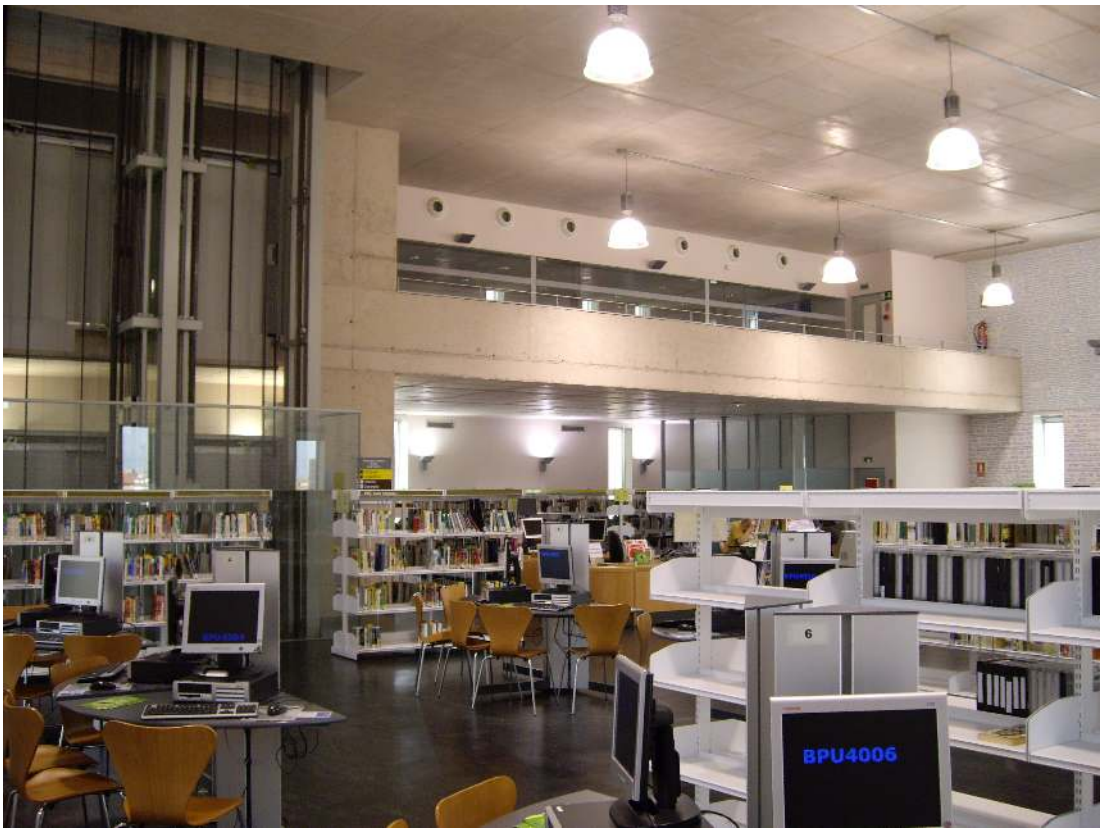


Figura 131: Vista interior de la biblioteca. *Interior view of the library.*

Figura 132: Vista aérea del mercado de Santa Catalina.
Santa Catalina; view from above.

Figura 133: Fachada principal.
Main facade.

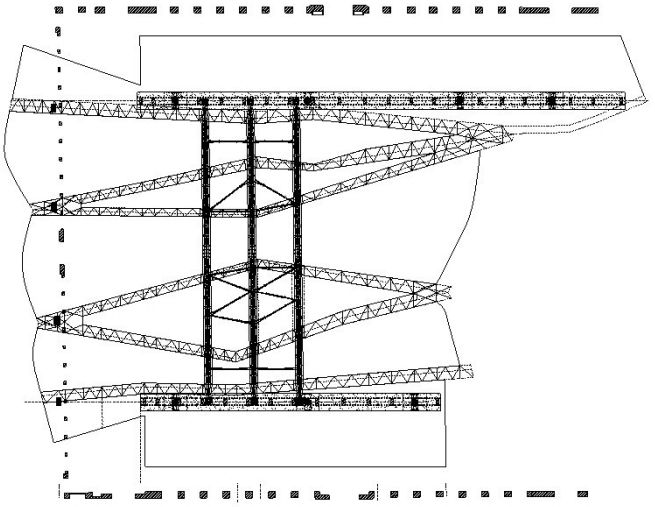


Figura 134: Planta con el esquema de la estructura principal.
Floor plan with diagram of the main structure.

Mercado de Santa Catalina

Santa Caterina market:
a roof in line with the best works by Gaudí and Jujol, and equally personal, too.

Santa Caterina market (1997-2004), Barcelona, figures 132 and 133, is by the architect Enric Miralles, while the structure was developed by the engineer José María Velasco (AMATRIA).
Miralles died in July 2000, but by then the work had been completely defined except for minor changes. I believe that this is one of his finest works, and that it is unclassifiable in the same way as the best works of Gaudí with Jujol, such as Batlló House, the Pedrera or Güell Park. Here I can see the connection between these three Catalan authors.
This work is built over the old market, of which only the exterior walls remain, figure 133, together with a wooden truss.
The project commences in the roof, in a way that is completely unconnected with the structure. It is like paper that has been wrinkled at random before being covered on the outside with coloured ceramics that reflect the bring colours of the market beneath it.
The first important structural decision was to create two lines of support perpendicular to the main facade, figures 134 to 137, which leave an open span of almost 43 m and finally take the form of post-stressed concrete beams.
These two beams are 42 m and 62 m long, and they rest on three and four concrete supports, respectively. The second pillar of each beam, counting from the main facade, is embedded in its corresponding beam. The other supports are moved lengthwise but transmit the torsion forces and some of the thrust from the roof.
The span of 43 m between supports was unnecessary for a market (as traditional examples show) but required a structure with a wide edge of at least 1/7 to 1/12 of the span, depending on the type of structure. This may create a design conflict with the "folds" in the roof: they have to be crossed with a structure, and both systems are more or less orthogonal.

El mercado de Santa Catalina:
una cubierta en consonancia con las mejores obras de Gaudí y Jujol, e igual de personal.

El mercado de Santa Catalina (1997-2004) en Barcelona, figuras 132 y 133, es obra del arquitecto Enric Miralles, siendo la estructura desarrollada por el ingeniero José María Velasco (AMATRIA). Miralles fallece en julio de 2000, pero la obra queda totalmente definida salvo cambios menores. Creo que es una de sus obras más sobresalientes; inclasificable, al igual que las mejores de Gaudí con Jujol, como la casa Batlló, la Pedrera o el parque Güell. En ese sentido, veo conexión entre esos tres autores catalanes.
La obra se asienta sobre el antiguo mercado, del que quedará finalmente solo los muros exteriores, figura 133, y alguna cercha de madera.
El proyecto nace desde la cubierta, y de forma totalmente ajena a la estructura. Es como un papel arrugado de manera arbitraria al que se forra exteriormente de cerámica de colores, que pretende reflejar el colorido del mercado que cubre.
La primera decisión estructural importante es la de crear dos líneas de apoyo, perpendiculares a la fachada principal, figuras 134 a 137, que dejan una luz libre de casi 43 m, y que, finalmente, se materializan con unas vigas de hormigón postesado. Esas dos vigas tienen una longitud de 42 m y 69 m, y se apoyan en tres y cuatro soportes de hormigón, respectivamente. El segundo pilar de cada viga, contando desde la fachada principal, se une rígidamente con la viga que le corresponde. El resto de apoyos es deslizante longitudinalmente pero transmitiendo los esfuerzos de torsión y parte de los empujes de la cubierta.
Esa luz de 43 m entre apoyos, que no tendría que ser imprescindible para el uso de mercado (los ejemplos tradicionales así lo atestiguan) requiere de una estructura con un canto importante, al menos del orden de 1/7 a 1/12 de la luz, dependiendo del tipo estructural. Eso podría crear un conflicto formal con las "plegaduras" de la cubierta: hay que atravesarlas con una estructura, ambos sistemas son más o menos ortogonales.

Figura 135: Vista aérea de la obra en fase de construcción. *Aereal view under construction.*

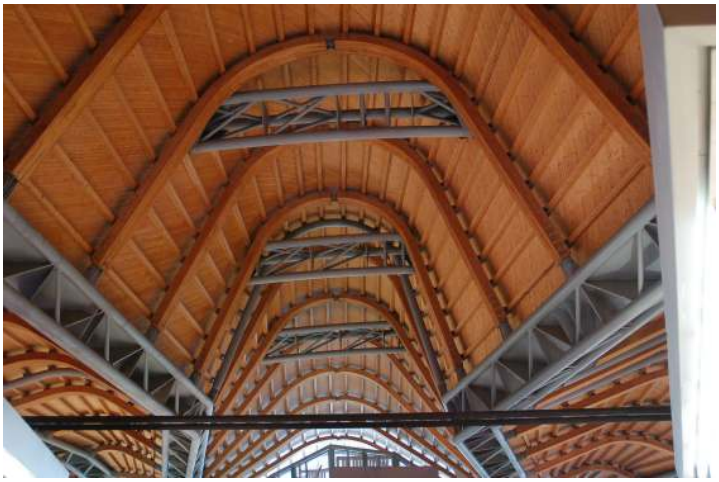


Figura 136: Vista interior de la cubierta.
Interior view of the cover.

Figura 137: Vigas laterales de hormigón postesado sobre las que apoyan los arcos centrales.
Lateral prestressed concrete beams that support central arches.

Although this could have been prevented by using shorter spans, the more open span of 43 m was preferred. To overcome this three central triangular latticework arches were used, figures 132, 134 and 135, braced by a pre–tensed boom to bring them under load and reduce movements. The arches are tied to each other to improvement their lateral stability.
From here on decisions were largely decided on the basis of the geometry of the folds. Continuous beams lie along the troughs between them, and these too are triangular and in latticework, figures 135 to 136. They rest on supports (or "bunches" of supports) close to the facades, figure 133, and in the arches, figure 135, hanging from them.
The next order is composed of arches, the majority of which are wooden, figure 136, while some are in tubular steel, especially those at the edges, figures 138 and figure 139. The wooden arches are made of a vertical sheet, due to their pronounced curvature, which is very rare.
After this point the folds begin. The structural decision was taken to use their shape to create vault–beams, which therefore collaborate at the same level as the zigzag beams that hang from the arches. This was not indispensible, and was clearly an option for structural optimisation. In fact it made the details of the joints in the trusses more complicated.
The majority of the folds are composed of a wooden structure, figures 136 to 139, and trusses between arches, the continuity of which arises because they are parts of the vault-beam structure; two families with an orthogonal relationship made of planks 1 cm thick and 15 cm wide; with mortise and tenon joints and placed at an angle of 45° respecting the trusses (i.e., triangulating the surfaces together with the trusses), figure 135.

Todo ello se podría evitar con luces más pequeñas, pero se ha preferido mantener esa luz de 43 m más diáfana. Y para salvarla se han dispuesto tres arcos centrales con una sección triangular y en celosía, atirantados por un cordón que se pretensa para hacerlos entrar en carga y reducir movimientos, figuras 132, 134 y 135. Los arcos se atan entre sí para mejorar su estabilidad lateral.
A partir de ahí las decisiones vienen derivadas, en gran medida, por la geometría de las plegaduras. En sus valles se disponen vigas continuas, también con sección triangular y en celosía, figuras 135 a 136, que apoyan en soportes (o "racimos" de soportes) próximos a las fachadas, figura 133; y en los arcos, colgándose de ellos, figura 135.
El siguiente orden lo forman arcos, la mayoría de madera, figura 136, y algunos de acero con sección tubular, especialmente en los bordes, figuras 138 y 139. Los de madera se realizan con un laminado vertical debido a su fuerte curvatura, algo poco usual.
A partir de ahí se llega ya a las plegaduras. Se tomó la decisión estructural de aprovechar su forma para crear bóvedas-viga, que colaboran, por tanto, al nivel de las vigas en zigzag que cuelgan de los arcos. Esto no era imprescindible, ha sido claramente una opción para optimizar la estructura. Obliga, de hecho, a detalles de uniones en las correas más complejos.
Las plegaduras se forman con una estructura, en su mayoría, de madera: correas entre arcos, que tiene continuidad porque son parte de la estructura de las bóvedas–viga, figuras 136 a 139; dos familias ortogonales entre sí de tablas de 1 cm de grosor y 15 cm de ancho, machihembradas y colocadas con un ángulo de 45° respecto a las correas (es decir, triangulando los paños junto con las correas), figura 135.

Figura 138: Fachada trasera, borde de cubierta. *Rear facade, edge of the fold.*

Figura 139: Fachada trasera, borde de cubierta. *Rear facade, edge of the fold.*

Figura 140: Mosaico que acaba la cubierta.
The mosaic finish on the roof.

The structural part reaches this far. Above these levels, and as the roofing, 4 cm × 4 cm rafters are placed at a distance of 60 cm, between which Rockwool insulation is inserted, together with two more levels of 1 cm × 15 cm planks arranged in the same way as the first ones.
The ceramic tiles are glued directly on to the latter, figures 132 and 140, using a resin which is both an adhesive and a waterproofing agent (the design of which was a challenge in itself). This ceramic finish is magnificent, and it is one of the main features of this work.
The bright colours of the roof ceramics are repeated in the structure, which is composed of reinforced pre-stressed concrete, laminated sawn wood and completely singular differently shaped steel sections. This is especially clear along some edges, where the structural patterns are truly personal and imaginative, such as the one shown in figure 139. The use of wood on the inside is almost as important as the use of ceramics on the outside.
The source of this work is not its structure, as is often the case. But the structure eventually fits the whole in a way that makes this work stand out, completely logically and quite efficiently. It is geometrically complex, as geometry that supports and adds value has to be. The work of Jose María Velasco on this structure shows great expertise.
The work of Miralles is as singular as it is magnificent. It would be extraordinary for any city to contain a work like this one, but Barcelona also has the abovementioned works by Gaudí and Jujol and would not be the same without them. However, it is not easy to apply all of their strategies, as some of them are too personal.

Hasta ahí llega la parte estructural. Sobre esas capas, y ya como cerramiento, se disponen listones de 4 cm × 4 cm a 60 cm entre los cuales se coloca el aislamiento de lana de roca, más otras dos capas de tablas de 1 cm × 15 cm con igual disposición que las primeras.
Sobre éstas se pega directamente la baldosa cerámica, mediante una resina que tiene funciones de adherencia e impermeabilización (cuyo diseño fue todo un reto). El acabado cerámico es magnífico, y una de los fundamentos principales de esta obra, figuras 132 y 140.
Ese "colorido" de la cerámica de cubierta se repite en la estructura, que usa hormigón armado y pretensado, madera laminada y aserrada y acero de distintos tipos, de manera totalmente singular. Esto es especialmente patente en algunos bordes, con esquemas estructurales realmente personales e imaginativos, como el que se muestra en la figura 139. Y el uso de la madera hacia el interior es casi tan importante como el de la cerámica al exterior.
Como ya hemos comentado, la obra no nace desde la estructura, cosa habitual. Pero la estructura acaba encajándose de modo que resalta la obra, con total lógica y eficacia. Con complejidad geométrica, como la forma que sostiene y que valora; así debe ser. El trabajo de José María Velasco con la estructura demuestra muchísimo oficio.
El trabajo de Miralles es tan singular como magnífico. Para cualquier ciudad es extraordinario contar con obras como esta, al igual que sucede con las obras antes mencionadas de Gaudí y Jujol. Barcelona no sería la misma sin ellas. Pero no es fácil aplicar todas sus estrategias; algunas son demasiado personales.

Figura 141: Palazzo del Lavoro, sala principal. *Lavoro Palace, main hall.*

Figura 142: Fachada del Palazzo. *Palazzo facade.*

Palazzo dell'Esposizione Internazionale del Lavoro

Lavoro Palace:
how geometry influences structural decisions.

The *Palazzo dell'Esposizione Internazionale del Lavoro*, is by the engineer Pier Luigi Nervi, with the help of the architects Giò Ponti and Gino Covre. It was built for Italia '61, the celebration of the centenary of the unification of Italy, figura 141.
Like other pavilions of this type, the building itself had to be an exhibit not only of cutting edge engineering and architecture, but also as a masterpiece in itself.
The pavilion has a square floor plan with sides measuring 156 m long. It is composed of four uniform modules.
Each module in the main storey, Figure 1.131, has a 38 m × 38 m structure of cantilevered steel beams embedded in 25 m tall reinforced concrete supports that vary in cross-section. The structure contains skylight strips. The lower floor holds several smaller rooms and auxiliary spaces, and it has a conventional structure.
The photographs here were taken in the year 2000. At the time the building was semi-abandoned, as is shown by the deterioration of the magnificent glazed facade, figure 142, with the external uprights that reinforce it against the wind[a].
There are two main structural problems here: The first problem is the warping of the reinforced concrete supports for long spans, figure 143, as this is resolved drastically by giving them a very broad edge.
To achieve this edge without adding a lot of mass to the support, he designed them with a varying cross-section that gradually alters from a solid circle at the top to a rounded cross-shape at the base. As he so often does, Nervi carefully selects a geometrical pattern as the basis this cross-section, thereby creating very beautiful supports.

[a]The uprights are not designed to function as supports too, to avoid interference with the working of the cantilver system . Unusual details are needed for this, and they have been very beautifully executed.

El Palazzo del Lavoro:
influencia de la geometría en las decisiones estructurales.

El *Palazzo dell'Esposizione Internazionale del Lavoro* de Turín (1959-61) es obra del ingeniero Pier Luigi Nervi, con la colaboración de los arquitectos Giò Ponti y Gino Covre. Se construye con ocasión del evento *Italia'61*, que celebraba el centenario de la unificación italiana, figura 141.
Como en otros pabellones de este tipo, el propio edificio debía ser objeto de exposición, no solo es ingeniería y arquitectura de vanguardia, es una pieza maestra.
El pabellón tiene planta cuadrada, de 156 m de lado, compuesto por 4 × 4 módulos iguales. La planta principal la forman, en cada módulo, una estructura de 38 m × 38 m realizada con vigas de acero en voladizo unidas rígidamente a soportes de hormigón armado de sección variable y 25 m de altura. En la estructura se crean unas bandas de iluminación cenital.
La planta inferior alberga varias salas menores y espacios auxiliares, y está realizada con una estructura convencional.
Las fotos que se muestran son del año 2000. El edificio estaba entonces medio abandonado, como se aprecia por el deterioro de la magnífica fachada acristalada, figura 142, con los montantes al exterior que proporcionan la resistencia a viento necesaria[a].
Hay dos grandes problemas estructurales: El primero es el pandeo de los soportes de hormigón armado de gran altura, que soluciona de forma drástica con un gran canto, figura 143. Para conseguirlo sin añadir mucha masa, el soporte tiene una sección variable que va cambiando, de forma gradual, de una sección circular maciza en cabeza a una planta en cruz redondeada en la base. Nervi, como hará muy a menudo, selecciona con todo cuidado un patrón geométrico como base del trazado de la sección, lo que produce un soporte de gran belleza.

[a]Los montantes no se diseñan como soportes para no interferir con el trabajo tipo del voladizo. Esto requiere detalles poco usuales, que han sido ejecutados con gran elegancia.

Figura 143: Arranque de los voladizos. *The base of the cantilevers.*

Figura 144: Despiece de los voladizos tipo. *Pattern of the standard cantilevers.*

The second and more important problem arises in the cantilevers with a span of almost 20 m, figure 144. He uses reinforced steel beams with varying cross-sections for these[a], adjusting the height of their lower edge. He also uses two different angles on the lower edge, thereby creating corbelling for the beam as well as a capital for the support.
This gives rise to a composition of shaft, capital and projecting architrave. Things like this are more important than may seem, as they allude to images in the collective memory.
There is a tendency to think that a cantilevered structure cannot be very effective. This is false, as continuous beams achieve the same efficiency with greater slenderness ratios. However, if there is the necessary edge, no differences in material consumption arise.
Nervi designed these cantilevers using the criterion of reasonable rather than minimum consumption of material, which is normal. Much material is wasted in the core of reinforced beams, while trusses with a larger edge and variable cross-section consume less material although they do not reduce the cost very much. He could also have braced the beams against an oversize support used as a mast, although this would cost about the same and completely change the project.
However, if we concentrate on the pattern of the beams here, what I believe to be one of the key reasons for the success of this work emerges. Once again, the basis for this is geometrical rather than strictly structural, figure 144.

[a] Reinforced steel beams consist of welded plates, i.e., non-standard sections.

El segundo problema, y el mayor son los voladizos de casi 20 m de luz, figura 144. Para resolverlo usa vigas armadas de acero[a] de sección variable, cambiando la cota del ala inferior. De ese modo, traza dos pendientes distintas creando un acartelamiento a la viga y, al mismo tiempo, un capitel al soporte.
Aparece, con ello, una composición de fuste, capitel y arquitrabe volado. Este tipo de cosas tiene más importancia de lo que pudiera parecer, ya que aluden a imágenes de la memoria colectiva.
Se tiende a pensar que una estructura en voladizo no es muy eficaz. Eso es falso. Lo que sí sucede es que las vigas en continuidad consiguen la misma eficiencia con mayores esbelteces. Pero si se dispone del canto adecuado, no hay diferencias de consumo de material.
El voladizo diseñado por Nervi no responde a criterios de consumo mínimo, pero sí tiene un consumo razonable. Esto es lo usual. Las vigas de alma llena utilizan más material del necesario. Una cercha de sección variable y mayor canto conseguiría reducir el consumo de material, aunque no tanto el coste. También se podrían haber atirantado las vigas contra un sobrecrecido soporte, convertido en mástil. Sin embargo, el costo no sería muy distinto y el proyecto cambiaría completamente.
Si nos fijamos en el despiece de la viguería, aparece lo que, para mí, es una de las claves del éxito de esta obra, y que tiene de nuevo una base geométrica más que estrictamente estructural, figura 144.

[a] Una viga armada de acero es la formada por chapones unidos por soldadura, es decir, perfiles fuera de catálogo.

Figura 145: Detalle de esquina de los aleros de los tempos de Toji (izqda.) y Daitokuji (dcha.), Kyoto.
Detail of the corner of the eaves of Toji temple (left) and Diatokuji temple (right), Kyoto.

Figura 146: Ampliación de la Estación de Atocha.
Atocha Railway Station extension.

El despiece elegido, vigas en abanico desde el soporte, sin otro orden adicional (forjado aparte), consigue la mayor limpieza geométrica posible. Además es una solución estructural muy eficaz, ya que se lleva la carga al soporte de la manera más directa. No es un problema nuevo. Veamos dos soluciones de la arquitectura tradicional japonesa, donde el orden es siempre una obsesión, figura 145.
En el tempo de Toji se usa la solución más común, con dos ordenes. Aparece entonces una viga en la diagonal. En el templo de Daitokuji encontramos una solución similar a la de Nervi en el *Palazzo del Lavoro*, solo un orden de viguetas gracias a una organización en abanico de las vigas al acercarse a la esquina. Es sorprendente cómo se repiten los problemas, de modo que es mucho lo que se puede aprender de la arquitectura tradicional.
Rafael Moneo, en su diseño de la cubierta para la Ampliación de la Estación de Atocha de Madrid, (1985–1992), apuesta por un esquema en dos órdenes, con vigas primarias en la diagonal. El proyecto, en mi opinión, tiene al *Palazzo del Lavoro* como referente. En este caso los módulos de estructura son sensiblemente más pequeños, de 18 m × 18 m. El soporte, de 23 m de altura, es de hormigón armado, de sección constante circular y maciza. El voladizo es también de vigas armadas de acero, tipo *Corten* en este caso. La retícula no es ortogonal, tiene una ligera distorsión relacionada con el contexto en que se inserta. Es evidente que cada elección, en gran medida de base geométrica, ya que en el fondo no implica grandes diferencias de coste, produce unos efectos formales bien distintos.
Como antes se comentaba, Nervi condiciona mucho el despiece de la estructura a un patrón geométrico. Por supuesto, manteniendo siempre una alta eficiencia mecánica. En el *Palazzo del Lavoro* consigue una comunión extraordinaria.

The pattern selected, beams fanning out from a support, without any additional order (apart from the roof) is as geometrically clean as it could be. This is also a highly effective structural solution, as loads are transmitted to the supports as directly as possible.
This is not a new problem. We will examine two of the solutions used in traditional Japanese architecture, figure 145, where order is always an obsession.
The most common solution has two orders and is the one applied in Toji temple, where a diagonal beam is used. In Diatokuji temple a similar solution to Nervi's in Lavoro Palace is used, with only one order of beams as they are arranged in a fan close to the corner. It is surprising how problems repeat themselves, so that a lot can be learnt from traditional architecture.
Rafael Moneo used two orders of beams in his design for the roof of the Extension to Atocha railway station (1985-1992), with diagonal primary beams. I believe that this project was based on Lavoro Palace, although in this case the structural modules are noticeably smaller, at 18 m × 18 m. The 23 m tall reinforced concrete supports have a constant circular and solid cross-section. The cantilevers are reinforced Cor-Ten steel beams here, and the grid is not orthogonal, as it is slightly distorted depending on its context.
It is clear that these choices, which are largely based on geometrical factors rather than costs, these being basically similar, give rise to very different design effects.
As was remarked above, Nervi's structure here is dominated by a geometrical pattern, although of course it always keeps a high level of mechanical efficiency. In Lavoro Palace he achieves an extraordinary symbiosis.

Figura 147: Ópera de Sydney, vista del solar antes de su construcción.
Sydney Opera, view of the site before the construction.

Figura 148: Enclave en la bahía, fotos actuales desde el centro de la ciudad.
View of the bay now from the city centre.

La ópera de Sydney

Figura 149: Vista aerea del edificio de la ópera.
General view of the opera building.

Sydney Opera House:
the beginning of the "popularisation" of iconic architecture.

Sydney Opera House (1957-1973), figure 149, is a project by the architect Jorn Utzon. The structure was by the engineering company ARUP. It is one of the most singular works of the 20th century, and it is also a paradox in terms of its design processes, as a catastrophic process led to an outstanding result.
The site of the design competition was where Macquarie fort had stood since 1821, until it was used as a tram depot from 1903. It is in an outstanding location, overlooking the bay and at the edge of the city centre, in front of the old Governor's Palace, figures 147 and 148.
It also stands next to a very important work, the compelling arch bridge of Sydney harbour (1924-1932). This spans 503 m and is 49 m above sea level, and from it the roof of the Opera House is perfectly visible. As Utzon says, the deck of this bridge is like a fifth facade.
There is a large amount of publically available information on the whole design process for the Opera House, most especially the successive "books" delivered by Utzon over the years. The project plans and old photographs shown here are from this source: `http://gallery.records.nsw.gov.au/index.php/galleries/sydney-opera-house/`
The so-called Brown book competition (1955) contains information on the conditions set for the international design competition, as well as images and data about the proposed setting. figures 152 and 153 show two current side views and the vertical views of the competition.

La ópera de Sydney:
comienzo de la "popularización" de la arquitectura icónica.

La ópera de Sydney (1957-73), figura 149, es un proyecto del arquitecto Jorn Utzon. La estructura la desarrolla la ingeniería ARUP. Es una de las obras más singulares del siglo XX, y una paradoja en lo tocante a los procesos de diseño: un resultado sobresaliente con un catastrófico proceso. El solar del concurso, donde se emplazó el fuerte Macquarie desde 1821 y luego un hangar de tranvías desde 1903, tiene un enclave privilegiado, mirando a la bahía, en un extremo del centro urbano, frente al antiguo Palacio del Gobernador, figuras 147 y 148.
Y muy importante: al lado del poderoso arco (1924-32) de acero de 503 m de luz cuyo tablero deja un gálibo de 49 m, desde el que se puede ver perfectamente la cubierta de la Ópera. La cubierta, como recuerda Utzon, es por ello una quinta fachada.
La Ópera pone a disposición pública un gran volumen de información sobre todo el proceso de diseño, y en particular de los sucesivos "libros" entregados por Utzon a lo largo de años. Los planos de proyecto y las fotos antiguas usadas aquí proceden de dicha fuente: `http://gallery.records.nsw.gov.au/index.php/galleries/sydney-opera-house/`
El llamado *brown book-competition* (1955) contiene la información sobre las condiciones establecidas en el concurso internacional, además de imágenes y datos sobre el enclave propuesto. En las figuras 152 y 153 se pueden ver dos vistas laterales actuales y los correspondientes alzados del concurso.

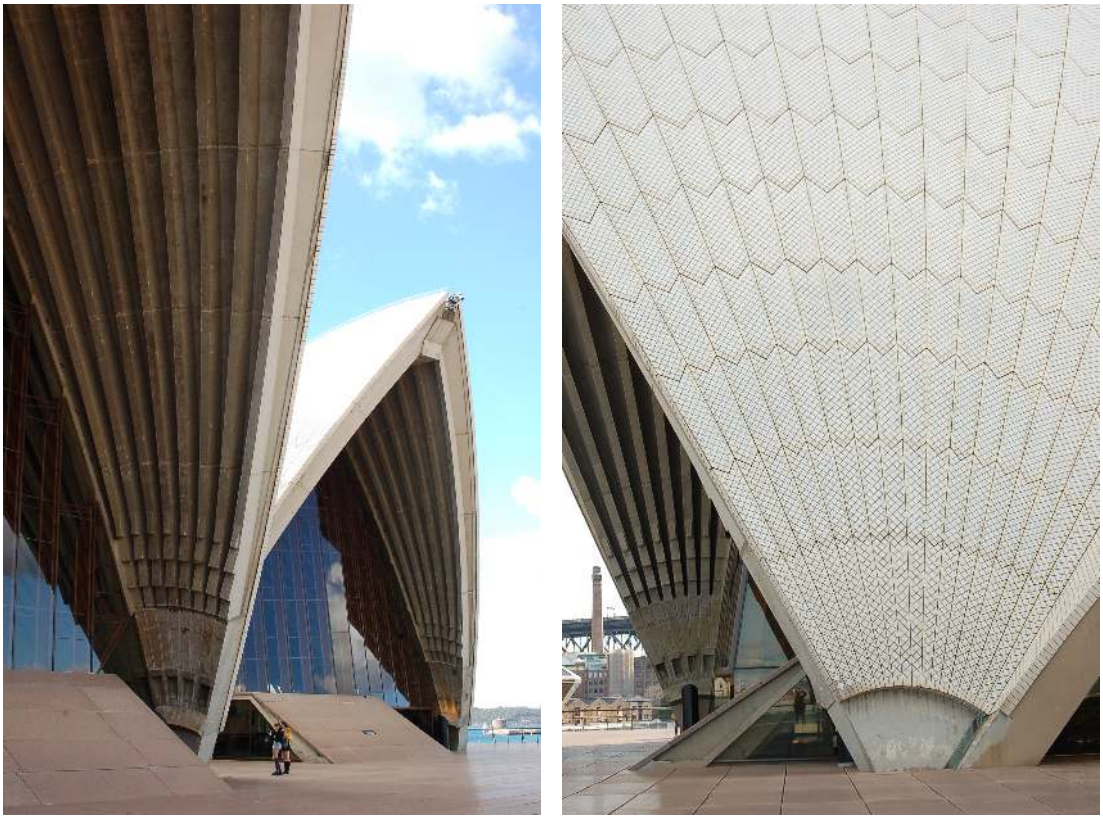


Figura 150: Vista de los arcos en abanico y de la cerámica que acaba el cerramiento al exterior.
View of fan arches and the ceramic finish on the outside.

Figura 151: Perspectiva del concurso.
Competition perspective.

Aunque la geometría no es exactamente la misma (de hecho no se definiría con precisión hasta 1961), creo que se podría decir que las trazas de las cubiertas se mantuvieron. Lo mismo sucede con la planta. Pero el anteproyecto se imaginaba unas cubiertas ejecutadas mediante unas finas láminas de hormigón, de pocos centímetros de espesor, del tipo de las de Candela. La figura 151, del *brown book-competition*, refleja esa idea.

Se aprecia, además, la separación entre los dos grandes volúmenes, la sala de conciertos y el teatro de la ópera, idea que contravenía las bases del concurso. La razón era que el solar se quedaba pequeño para el uso propuesto, y fraccionar las salas reduciría el aforo notablemente.

Pero el arquitecto Eero Saarinen, que formaba parte del jurado y tenía el mayor peso como profesional de prestigio, desniveló la balanza a favor de Utzon. La propuesta de Utzon sintonizaba completamente con la arquitectura de Saarinen, como este demostrará en la terminal de la TWA del Aeropuerto JFK de Nueva York (1962) o la terminal del aeropuerto de Dulles (1962).

El gran zócalo sobre el que arrancan las cubiertas tiene una justificación visual, camufla el volumen inferior de los espacios auxiliares de la caja escénica. La majestuosa escalinata se topa, a poca distancia, contra un muro de contención de varios metros (límite de la finca del antiguo Palacio del Gobernador). La entrada principal real es tangencial, figura 154, y además se mete bajo la escalinata, dejando ver unas grandes zancas de hormigón postesado que recuerdan el trabajo de Nervi.

¿Cómo acabó la idea de construir una cubierta mediante finas láminas de hormigón? Terminó utilizando arcos prefabricados postesados de hasta 2 m de canto, figura 150.

¿Qué pasó entre medias para que existiese una diferencia abismal?

Arup, al comienzo, pidió opinión a varios expertos en láminas de hormigón. Entre ellos a Candela, que inmediatamente aseveró que las finas láminas eran totalmente incompatibles con la geometría propuesta. Y tenía razón. Candela fue siempre, por ello, muy crítico con la obra.

Desde 1957 hasta 1963 se barajan, al menos, doce soluciones estructurales diferentes. Utzon no entendía por qué las finas láminas no eran viables. Se negaba a cegar, ni siquiera mínimamente, las aperturas de las "conchas". Y entonces hacía falta mucho más canto.

Although the geometry is not exactly the same (and in fact this was not exactly determined until 1961), I believe that the roof designs were followed, as was the case for the floor plan, too.

However, the draft project was for thin concrete shell roofs just a few centimetres thick, like those by Candela. Figure 151 from the *brown book competition* reflects this idea.

The separation between the two large buildings for the concert hall and opera house can also be seen.

This idea broke with a basic competition rule, which stated that there should only be one building due to the small area of available land, as having two separate buildings would greatly reduce their capacity.

Nevertheless, the architect Eero Saarinen, who was in the jury where his opinion had more weight due to his prestige, tipped the balance in favour of Utzon. The latter's proposal was completely in tune with Saarinen's style, as is shown by his TWA terminal in JFK airport, New York (1962) or Dulles airport terminal (1962).

The large base under the roofs is justified visually, as it masks the smaller size of the auxiliary stage spaces. After a few metres the majestic stairway stops at a tall wall which marks the edge of the old Governor's Palace.

The true entrance is tangential, figure 154, and moreover it is under the stairway and shows large post-stressed reinforced concrete legs that recall Nervi's work.

What happened to the idea of building a roof using thin concrete shells? It ended up in prefabricated post-stressed arches up to 2 m wide, figure 150.

From the first ARUP had asked for the opinion of several experts in concrete shells. These included Candela, who immediately said that thin shells were totally incompatible with the proposed geometry. And he was right. This is why he was always so critical of this work.

From 1957 to 1963 at least twelve different structural solutions were considered. Utzon did not understand why thin concrete shells were not viable. He refused to close the openings in the "shells" even minimally, so that a far wider edge was needed.

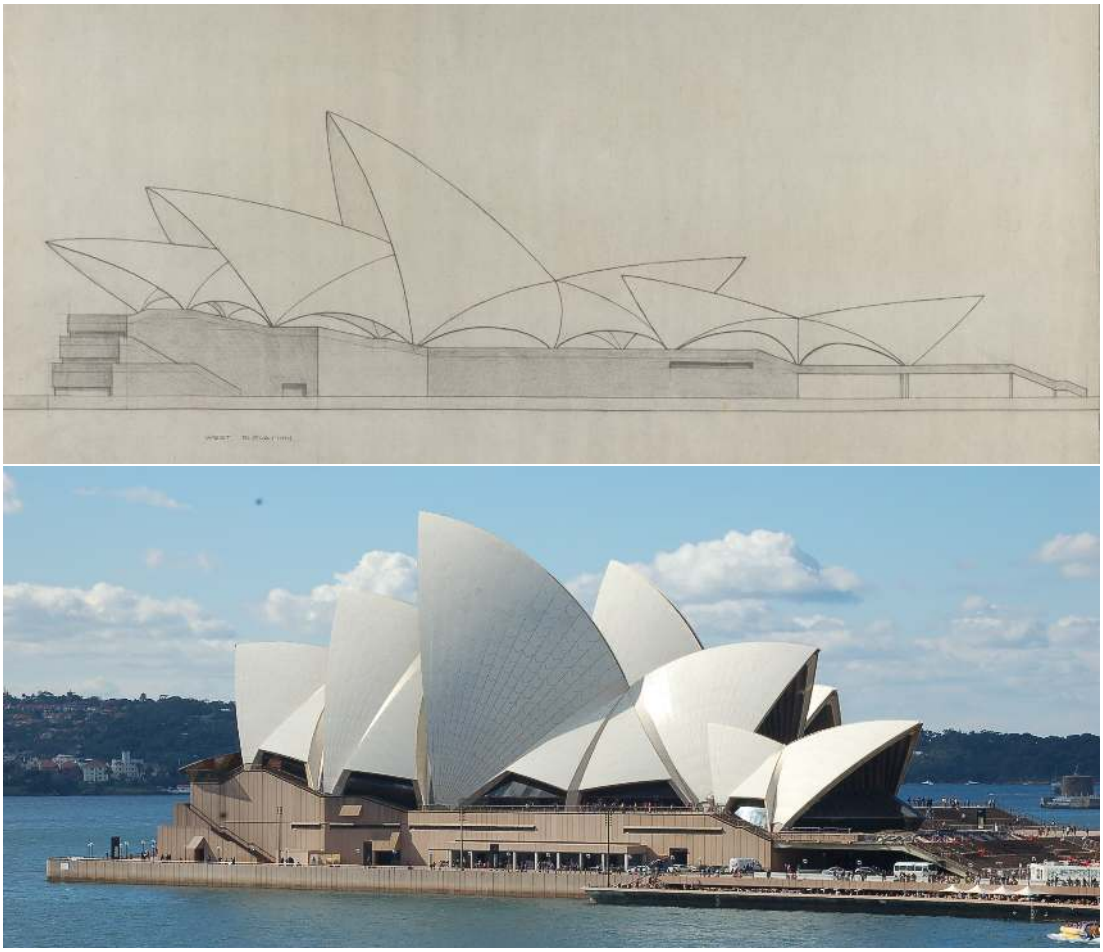


Figura 152: Vista lateral desde el puente, planos de concurso e imagen actual.
Side view from the bridge, competition plans and view now.

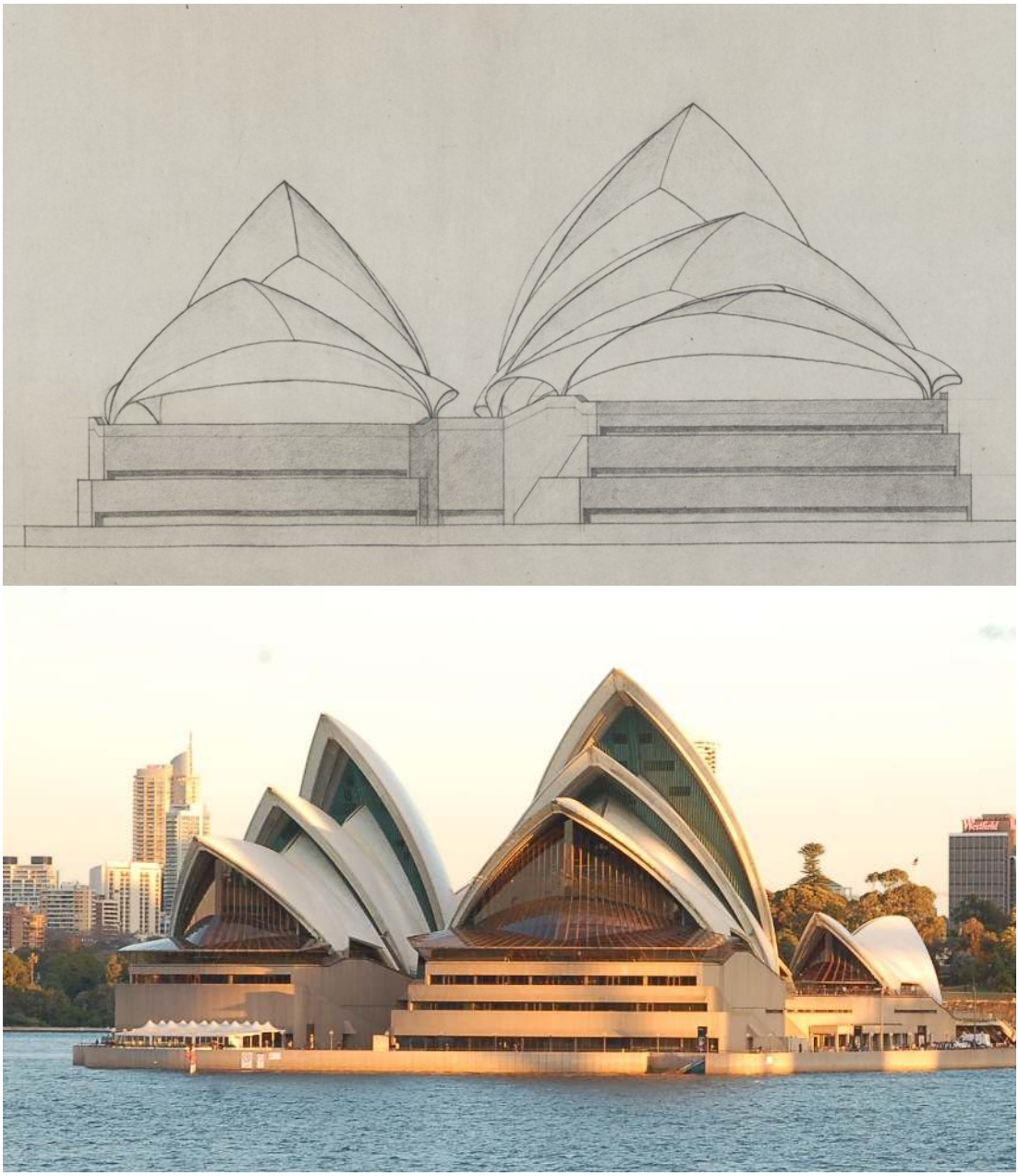


Figura 153: Alzado a la bahía, planos de concurso e imagen actual.
Vertical view from the bay, competition plans and view now.

Figura 154: Acceso lateral desde el centro de la cuidad. *Side entrance from the city centre.*

Figura 155: Despiece geométrico de las cubiertas con base en la misma esfera.
Geometrical breakdown of the roofs based on the same sphere.

Fue una de las primeras estructuras de edificación en las que se usó el ordenador. Eso sí, del tamaño de un armario y a un coste que tuvo que cofinanciar la propiedad con ARUP. Y el mayor modelo de análisis usado tenía sólo 136 nodos que daban lugar a la resolución de un sistema de ecuaciones con 780 incógnitas. Y con software no comercial, hubo que implementarlo *ad hoc*. Hoy los ordenadores más potentes resuelven ya más de un millón de incógnitas. Y cualquier software comercial de cierta calidad aborda ahora el problema con toda comodidad.

El proyecto tuvo un punto de inflexión importante con la decisión de que todas las cubiertas tuvieran una geometría que proviniese de cortes de una esfera de unos 75 m de radio, figura 155. Se trataba de una cuestión fundamental, ya que no existía software de CAD, y la definición de la geometría de las cubiertas era un problema no menor. El uso de la esfera simplificaba todo notablemente y era compatible con las formas iniciales de proyecto. ¡Eureka!

A partir de ahí, a Utzon le encajaba la solución de arcos en abanico, a pesar de que tenía muy poco que ver con el concurso, figura 150. En realidad, estos giros en un proyecto son muy normales, pero a Utzon le llevó años aceptarlo.

En 1965, después de un cambio de gobierno, Utzon deja la obra. Amargamente. Se negará a volver a Australia. Parecía no entender las "prisas" del promotor ni su alarma por cómo se disparó el coste. El proyecto tuvo un retraso de diez años y un factor de incremento de coste de, aproximadamente, 14. Tuvieron que sacar una lotería para financiar la obra, y la cosa podría haber sido mucho peor si Utzon hubiese seguido al frente de la obra.

En una entrevista, el arquitecto comenta que él construía al modo en que se hicieron las catedrales. Pero no parece que eso pueda ser hoy día, a priori, admisible. Al menos no era parte de las reglas del juego. Se trataba de una obra importante para la ciudad pero que, en modo alguno, estaba destinada a ser lo que fue: una de las imágenes más simbólicas de un país, Australia. Utzon no tenía derecho alguno a dar ese rumbo a la obra. La paradoja es que, tiempo después, sería una obra totalmente rentable para el país.

This was one of the first building structures for which a computer was used. However, it was the size of a cupboard and the cost of using it had to be paid for by the owner and ARUP.

The largest analytical model used had only 136 nodes, leading to the resolution of an equation system with 780 unknowns. As the software was not commercial, it had to be implemented ad hoc.

Nowadays the most powerful computers can handle more than one million unknowns. Any fairly good commercial software nowadays would swiftly solve the problem.

An important turning-point in the project was the decision for all of the roofs to share the geometry of segments of a sphere with a radius of about 75 m, figure 155.

This was fundamental, given that no CAD software existed and defining the roof geometry was a major problem. Using a sphere greatly simplified everything and it was also compatible with the initial forms used in the project. Eureka.

Based on this, the solution of a fan of arches fitted Utzon's concept, figure 150, even though it had hardly anything to do with the competition. Such changes are actually quite normal, but Utzon did not accept this for years.

In 1965, after a change of government, Utzon bitterly abandoned the work and refused to return to Australia. It would seem that he did not understand the "hurry" of the promoter or his alarm at the rapidly increasing cost.

The project was delayed by ten years and the cost had increased by a factor of about 14. A lottery was launched to finance the work, and things could have been a lot worse had Utzon remained as the Head of the work.

Utzon said in an interview that he built in the same way that the cathedrals were built. However, this does not seem to be a priori acceptable nowadays, or at least it was not one of the rules of the game.

Although this was an important work for the city, the aim was never for it to become what it eventually was: one of the most symbolic images of a country, Australia. Utzon had no right at all to work at this pace. The paradox is that it became a work that is now completely positive for the country.

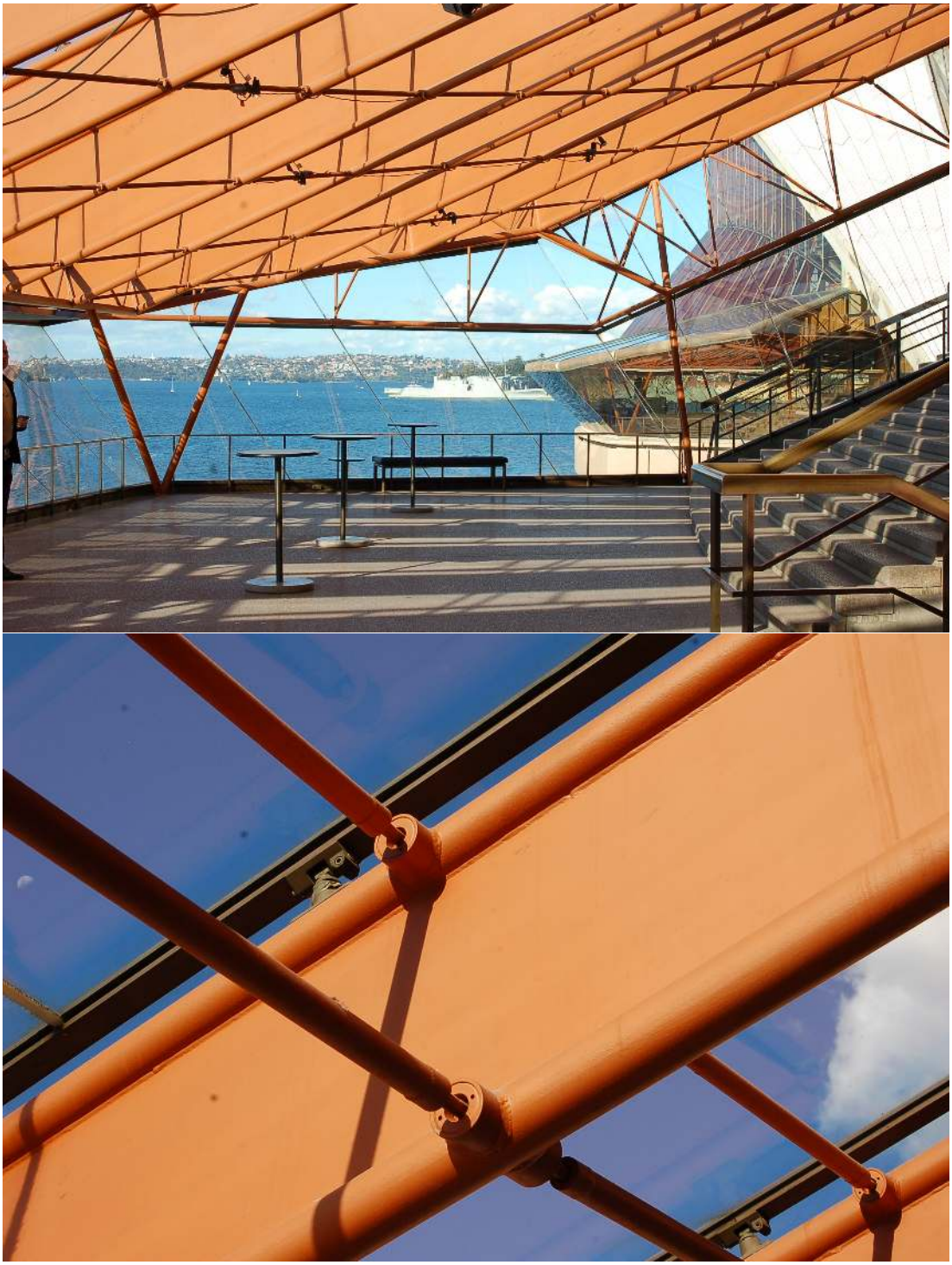


Figura 156: Ópera de Sydney, estructura de la gran cistalera con vistas a la bahía. *The structure of the large window looking over the bay.*

Utzon's departure left some of the facade glazing unfinished, together and more importantly with the interiors of the halls. His withdrawal was not without effect on the work, as everything done afterwards is far lower quality than the rest.
For example, if we compare the magnificent glazing giving on to the bay constructed under his direction, figure 156, with other smaller glazed areas installed afterwards, the difference is brutal. And that is without mentioning the hall interiors.
In Sydney Opera House Utzon left an architectural masterpiece. An opera house with functional problems, one that multiplied costs and times incredibly, and one that became the symbol for the whole country that nobody had asked for. He got it right in the end, and this is a marvellous work.
The changes in its structure are history, and in fact structure here plays very much a secondary role. The roof geometry, which kept its initial lines at all costs, is sculpture of the first order. It is the geometry of this work that makes it special, and the structure eventually used fits it perfectly, even if it is not the one that figured in the competition. The whole thing is a paradox, and the processes followed in creating it are not exemplary in any sense.
The choice of ARUP was surely not the best possible one at the time. A very young Peter Rice was eventually named head of the work, and as soon as the job was finished he left for the USA to do a master's degree. However, it is also true that Utzon displayed very little flexibility and took a long time to accept substantial changes, which is unreasonable.
The competition was held at a time when the modern movement was languishing, and the work ended at the commencement of post-modernism. These are relevant facts. I believe that involuntarily this work marked the start of the popularisation of iconic architecture which has peaked in recent years, when even a winery can aspire to become an international icon. This is a phenomenon without historical precedents that is doubtless due to the emergence of the mass media.

La marcha de Utzon deja sin finalizar algunas partes acristaladas de la fachadas y, sobre todo, el interior de las salas, lo que no fue inocuo para la obra. Lo ejecutado sin su dirección dista mucho de la calidad del resto.
Si se compara, por ejemplo, las magníficas cristaleras a la bahía construidas bajo su dirección, con otras menores posteriores, la diferencia es brutal, figura 156. Y no hablemos del interior de las salas.
Utzon ha dejado en la ópera de Sydney una obra maestra de arquitectura. Una ópera con problemas funcionales, que multiplicó de forma increíble plazos y costes, y convertida en un icono de todo el país que nadie había demandado. Y al final acertó: Es una maravillosa obra.
Los cambios de la estructura son ya historia. De hecho, la estructura tiene un papel muy secundario. La geometría de las cubiertas, que mantuvo las trazas iniciales a toda costa, forma una pieza escultórica de primer orden. Es la geometría lo que hace de esta obra algo muy especial. La estructura final, a pesar de diferir de la del concurso, encaja perfectamente con esa forma inicial. Toda una paradoja. Eso sí, los procesos seguidos no son precisamente ejemplares.
La elección de ARUP no fue, seguramente, la más adecuada en aquel momento. Al frente de la obra acabó estando un jovencísimo Peter Rice que, nada más finalizarla, se marchó a hacer un máster a EE.UU. Pero también es cierto que Utzon mostró muy poca flexibilidad, y tardó muchísimo en aceptar cambios sustanciales. Y eso no era razonable.
El concurso se hace en un momento en que el espíritu del movimiento moderno languidece, y la obra se acaba a las puertas del post-modernismo. No son dos datos menores.
Esta obra, creo que de forma involuntaria, supone el comienzo de la "popularización" de la arquitectura icónica, aunque ese fenómeno vivirá su auge en los últimos decenios (cuando hasta una bodega puede aspirar a convertirse en icono internacional). Es un fenómeno sin precedentes históricos y que, sin duda, tiene que ver con la aparición y difusión de los medios de comunicación.

Figura 157: Barajas, T4, cubierta de los diques. *T4 in Barajas, view of the cover.*

Figura 158: Vista de la terminal de viajeros. *View of the lounge.*

Terminal T4 aeropuerto de Barajas

Figura 159: Barajas T4, vista del terminal.
General view of terminal.

Barajas T4:
a simple clear pattern with an especially warm interior atmosphere.

The new Barajas airport terminal, T4, figures 157 to 159, is by two teams of architects: Lamela and Richard Rogers. The structure was developed by several teams of engineers.
It is composed of two buildings with very similar designs, the terminal and its satellite, which are about 2 km apart. There is also a large car-park next to the terminal.
The terminal is arranged in three parallel volumes at six levels, three of which are subterranean, and are separated by light wells known as "canyons".
The satellite has two volumes and a single "canyon". They cover a total of almost 1 million m^2 and the concourses of both buildings are about 1 km long.
They were built in less than four years. This made it necessary to use a relatively simple and above all modular design.
The lineal pattern of the departure and arrivals areas makes them very clear for passengers, who are often first-time users of the terminal. This clarity is good for the working of the airport in general.
The car-park is an 8 m × 8 m modular construction with reticular reinforced concrete floors, making it possible to make maximum use of parking space in a simple and economical structure.

La T4 de Barajas:
un esquema simple y claro con un ambiente interior especialmente cálido.

La nueva terminal T4 del aeropuerto de Barajas es obra de dos equipos de arquitectos: el Estudio Lamela y el de Richard Rogers, figuras 157 a 159. La estructura la desarrollan varios equipos de ingeniería.
Se compone de dos edificios formalmente muy similares, el terminal y el satélite, separados 2000 m. Además, un gran aparcamiento se sitúa próximo al terminal.
El terminal se organiza en tres volúmenes paralelos con seis niveles, tres de ellos bajo rasante, separados entre sí por unos patios de luz que llaman "cañones". El satélite consta de dos volúmenes con un solo "cañón". En total casi 1 millón de m^2 construidos, con longitudes en los diques del orden de 1000 m en ambos edificios.
La obra se termina en menos de cuatro años. Para ello era necesario recurrir a un diseño relativamente simple y, sobre todo, modular, como así se hizo. El esquema lineal de los diques de embarque y desembarque son de gran claridad para el viajero que usa la terminal por primera vez. Esa claridad es buena, en general, para todo el funcionamiento del aeropuerto.
El aparcamiento se construye con una estructura modular de 8 m × 8 m y forjados reticulares de hormigón armado, lo que permite un gran aprovechamiento del parking utilizando una estructura simple y económica.

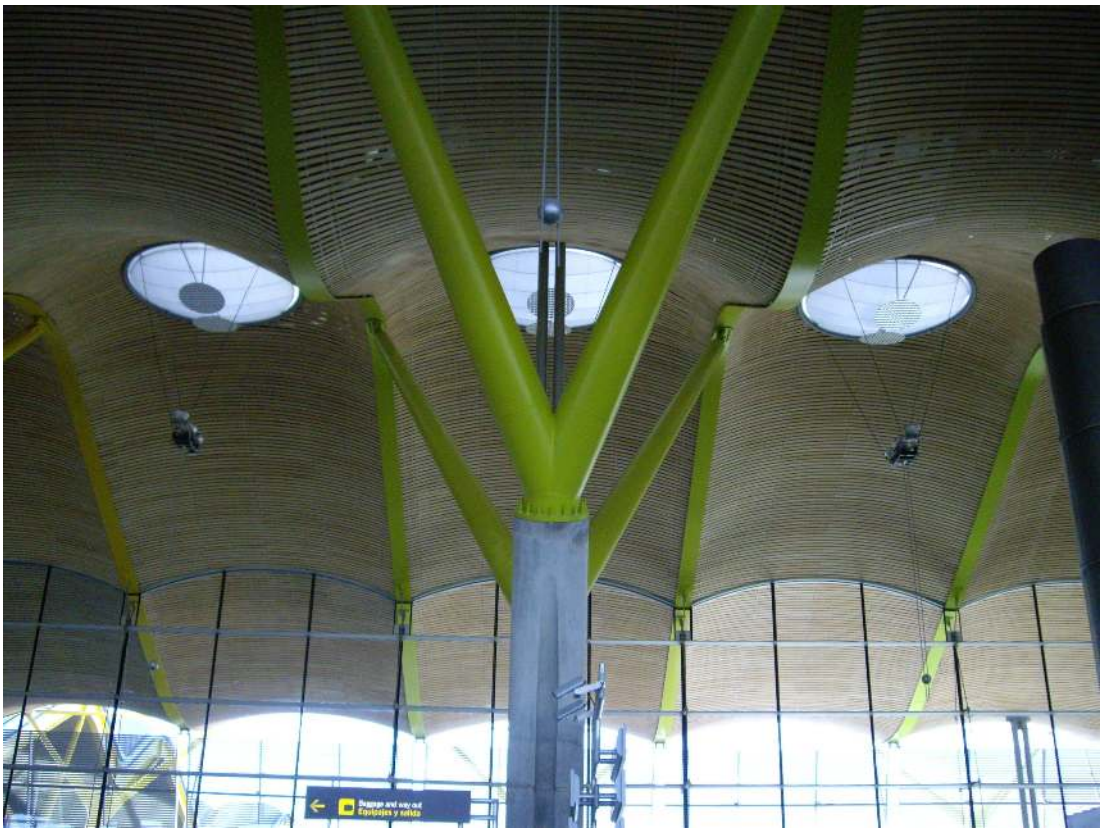


Figura 160: Módulo de los diques. *Module of the pier.*

Figura 161: Fachada con estructura tensada.
Facade with the tensed structure.

The terminal and satellite have a 9 m modular structure with spans of 9 m and 18 m, according to zone. The roof, its support and the concourse have a metal structure, figure 158. The rest of the building is in reinforced pre-stressed concrete, which is very logical.
There are dilation joints every 72 m. There are post-stressed beams along the length of the building, with four 18 m spans and edges of 0.9 m and 0.8 m which form porticos with the supports. The portico modules measure 9 m from axis to axis. Pretensed alveolar slabs rest on the beams, with 7.2 m spans between the supports and with an edge measuring 20 cm or 30 cm depending on their load, and always with a 10 cm compression layer. The whole design is highly rational and is largely prefabricated.
The primary structure of the roof of the concourses is arranged transversally, with 72 m long undulating projecting beams every 9 m forming the modules.
There are supports 18 m apart every two modules, figure 160. They consist of concrete bases from which **V**–shaped supports rise up to the beams. Each beam has four supports, with a maximum span of 27 m every three modules.
The undulating beams, in the form of gull wings according to the designers, are reinforced steel double **T** beams with edges from 0.75 m and 1.5 m wide. The second order of the roof is composed of an arch-shaped reinforced steel beam with a span of 3.5 m that shapes the roof, covered by trusses and finally sheet metal.

El terminal y el satélite tienen también una estructura modular, de 9 m, con luces de 9 m y de 18 m, según las zonas. La cubierta y sus soportes, la zona de los diques, tiene una estructura metálica, figura 158, el resto es de hormigón armado y pretensado, algo muy lógico.
Hay juntas de dilatación cada 72 m. En todo el zócalo de hormigón se disponen vigas postesadas a lo largo del edificio, con cuatro vanos de 18 m de luz y cantos de 0,9 m y 0,8 m que forman pórticos con los soportes. Los pórticos están separados 9 m entre ejes, un módulo. Sobre las vigas se apoyan losas alveolares pretensadas, con luces entre apoyos de 7,2 m y un canto de 20 cm o 30 cm, según la carga, y siempre con una capa de compresión de 10 cm. Todo este diseño tiene una gran racionalidad y un grado importante de prefabricación.
En la cubierta de los diques la estructura primaria se organiza transversalmente, con vigas onduladas de 72 m de longitud en proyección en planta separadas 9 m, el módulo. Los soportes, que arrancan siendo de hormigón, están situados cada dos módulos, 18 m, figura 160. De ellos nacen soportes en **V** hacia las vigas. Cada viga tiene cuatro apoyos con una luz máxima de 27 m, tres módulos.
Las vigas onduladas, con forma de ala de gaviota, según los autores, son vigas armadas de acero en doble **T**, con cantos de entre 1,5 m y 0,75 m. El segundo orden de la cubierta son las vigas armadas de acero en separadas 3,5 m, que dan forma a las cubiertas. Sobre ellas se disponen las correas y luego una chapa metálica.

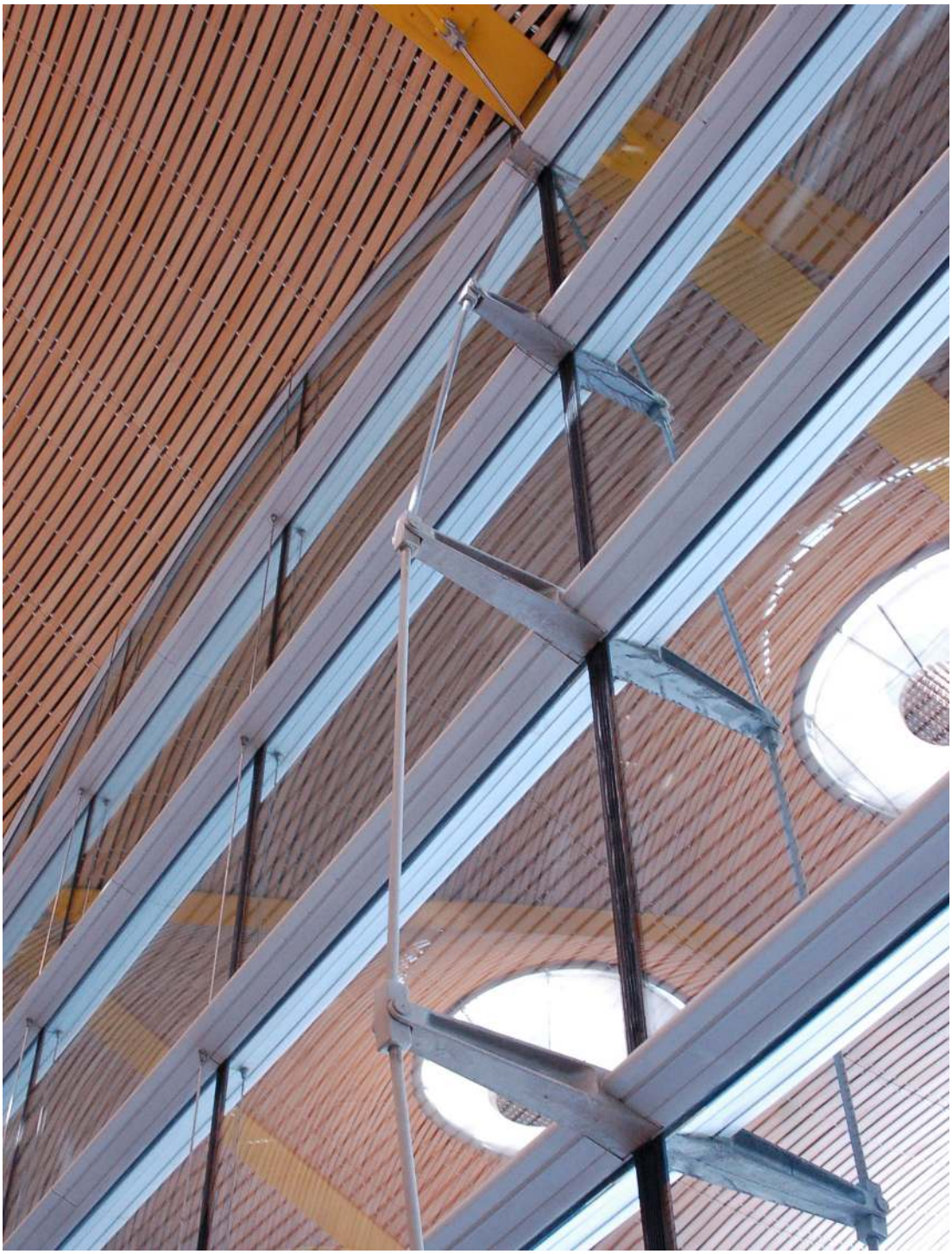


Figura 162: Detalle de la fachada con estructura tensada. *Detail of tensile facade structure.*

The central **V**–shaped steel supports have a tapering conical cross-section that is embedded in the base. Their diameter varies from 0.75 m at the base to 0.4 m at the top, where they are joined to the beam by a ball-and-socket joint, with a truss between the beams to close the thrust. The supports on the sides close to the facades are **Y**–shaped. They are composed of a double elliptical 480 mm×240 mm tube in their main axes, and they too are braced at the top.

The main structure of the glass facades of the concourses, figure 162, is composed of a pre-tensed braced fish-shaped frame, which is a classic tensile structure. The metal framework forms the secondary structure. Although this tensing of the facades overloads the main beams, it favours the bracing of the whole structure.

The undulating roofs hinder the drainage of rain water, so that pumps have to be used, which is not desirable. As far as I know, to date problems have arisen only once in this respect. This undulating shape has nothing to do with structural considerations, as it is purely architectural. It is one of the key design features of the building.

A far more economical metal structure could have been built for these spans. However, the use of the buildings justifies the extra cost, and the quality of the space within the concourses is magnificent.

There is plentiful natural lighting, and that is not always the case. The false ceiling in bamboo creates a very warm atmosphere.

The success of this work arises largely from its modular nature and simplicity. As the concourses are so long the metal structure is paining in different colours to aid orientation.

Although the portico structure of the concourses is somewhat forced, it is acceptable. The rest of the building is larger and more expensive, and it is also very rational and largely prefabricated.

Although structure here is not the generating source, it is very well chosen and supports the project. I have visited quite a few terminals of this size, and I believe that Barajas T4 is the friendliest of them all.

Los soportes centrales en **V** de acero tienen sección variable troncocónica, empotrada en el arranque, con un diámetro que va desde 0,75 m en la base a 0,4 m en punta. Ahí se unen a la viga mediante una rótula esférica, apareciendo un tirante entre vigas para cerrar el empuje. Los soportes laterales, cerca de las fachadas, tienen forma de **Y** y se componen de un doble tubo elíptico de 480 mm × 240 mm en sus ejes principales, y también se atirantan en cabeza.

La estructura principal de las fachadas acristaladas de los diques, es una estructura atirantada tensada en forma ahusada, un diseño clásico en el campo de las tensadas, figura 162. A partir de ahí la carpintería hace de estructura secundaria. El tesado de esas fachadas sobrecarga las vigas primarias, aunque favorece el arriostramiento del conjunto.

La ondulación de las cubiertas no favorece la evacuación de aguas. Es necesario añadir bombas, algo nada deseable. Hasta el momento, que yo sepa, sólo ha habido problemas en una sola ocasión. Esa forma no se deriva en absoluto de un planteamiento estructural sino sólo arquitectónico. Es una de las claves formales del edificio.

Con esas luces, se podría haber propuesto una estructura metálica mucho más económica. Pero el uso justifica ese sobrecoste. La calidad de los espacios de los diques es magnífica. Hay mucha iluminación natural, cosa que no siempre sucede en casos similares. Y el falso techo de bambú da una enorme calidez.

La modulación y la simplicidad del esquema son aspectos muy relevantes del éxito de esta obra. Dada la gran longitud de los diques, la estructura metálica se pinta de colores para ayudar al usuario a orientarse.

La estructura de los diques, porticada en definitiva, está algo forzada, pero de forma asumible. El resto, la de mayor volumen y coste, es muy racional y tiene un alto grado de prefabricación. La estructura no es generadora pero está muy bien elegida y apoya al proyecto. He visitado ya bastantes terminales de esta envergadura, y creo que la T4 de Barajas es la más agradable de todas ellas.

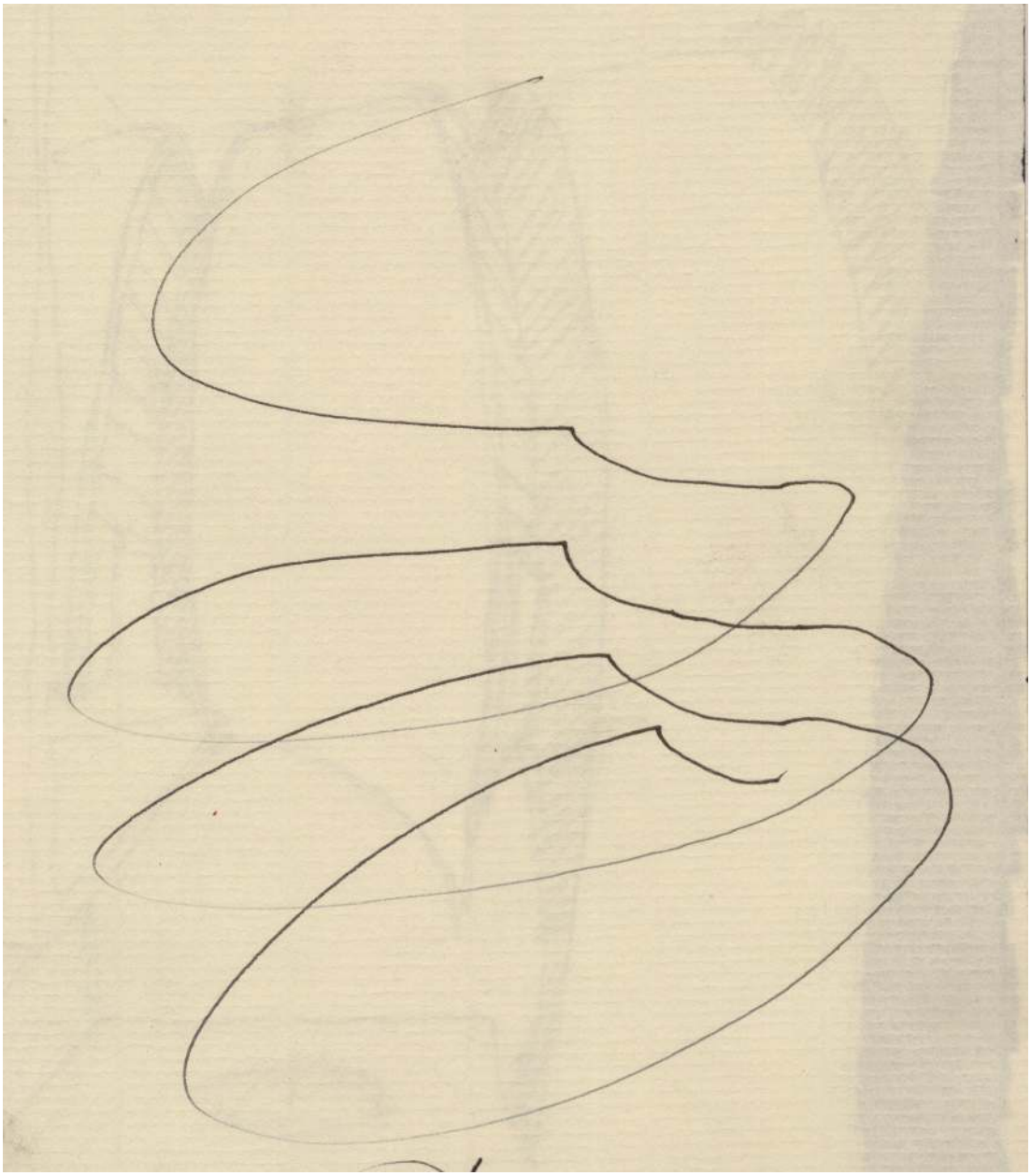


Figura 163: Museo Guggenheim, New York. *Guggenheim museum in New York.*

Museo Guggenheim de New York

The Guggenheim Museum, New York: a helicoid to heaven.

The Guggenheim Museum in New York is by Frank Lloyd Wright, figures 163 to 167. It opened on 21 March 1959, after 16 years of work from its inception to its construction. Wright died on 9 April that same year. It is an emblematic work, the culmination of a remarkable career.

Wright kept the spirit of the first American pioneers, from north to south, from different origins, who built free of ties to the old continent.

This building is a large helicoid, figure 167. The interior of the building is where it prepares and reaches its peak.

The idea was for the lift to carry you to the top floor, from where you would descend in a spiral. Each turn contains a ledge that slows you slightly, aiding orientation.

This building is in reinforced concrete, lightened in the 4.4 m projection which forms the helicoid inside. This edge has a 1 m tall wall angled inwards, in the form of an almost 30 m diameter cone that diminishes slightly in size as it ascends, inversely to what happens on the outside.

Wright always fully dominated structure, as of course he does here. It melds into his architectural project discreetly and masterfully.

In the same way as everyone else, Wright was not a born master. You only have to see his first works in Oak Park, Chicago, to see how like everyone he started off in clumsy steps. Nowadays this fact seems to be denied rather than merely forgotten.

I spent three days looking at this building and drawing it inside and outside, in winter. I would have liked to have spent far longer on it. I have an unforgettable memory of its interior space. It is quite restricted as a museum by the height between the storeys. But as Billy Wilder would say, "nobody's perfect".

El museo Guggenheim de New York: un helicoide hasta el cielo.

El museo Guggenheim de New York, figuras 163 a 167, es obra del arquitecto Frank Lloyd Wright. Se inauguró el 21 de marzo de 1959, después de 16 años de trabajo entre su concepción y su construcción. Wright falleció el 9 de abril de ese mismo año. Es una obra emblemática, blasón de una carrera apabullante.

Wright mantiene ese espíritu de los primero pioneros americanos, de norte a sur, de distintos orígenes, que construyen libres de las ataduras del viejo continente.

El edificio es un gran helicoide, figura 167, y es en el interior donde se gesta y alcanza su culmen. La idea era que el ascensor llevase al visitante hasta la última planta y, desde ahí, se bajase "en espiral". En cada vuelta sitúa un resalto que retiene el descenso ligeramente, al tiempo que facilita la orientación.

El edificio es de hormigón armado, aligerado en el voladizo de 4, 4 m que formaliza el helicoide hacia el interior. En ese borde se dispone un peto de 1 m inclinado hacia el interior y que se desarrolla sobre un cono, cuyo diámetro de casi 30 m, disminuye ligeramente al subir, a la inversa de lo que sucede en el exterior.

Wright siempre tuvo un gran dominio de la estructura, aquí, por supuesto, también. Se funde con su proyecto de arquitectura, con discreción y maestría.

Wright no nació siendo un maestro; nadie lo hace, obviamente. Solo hace falta ver sus primeras obras en Oak Park, Chicago, en donde se aprecia como todos comenzamos con pasos torpes. Pero este hecho es algo que parece hoy, no ya olvidado, sino negado.

Estuve tres días viendo y dibujando este edificio, por fuera y por dentro, en invierno. De haber podido le hubiese dedicado mucho más tiempo. Tengo un recuerdo inolvidable del espacio interior. Como espacio museístico está bastante limitado por la altura entre plantas, pero, como diría Billy Wilder: "nadie es perfecto".

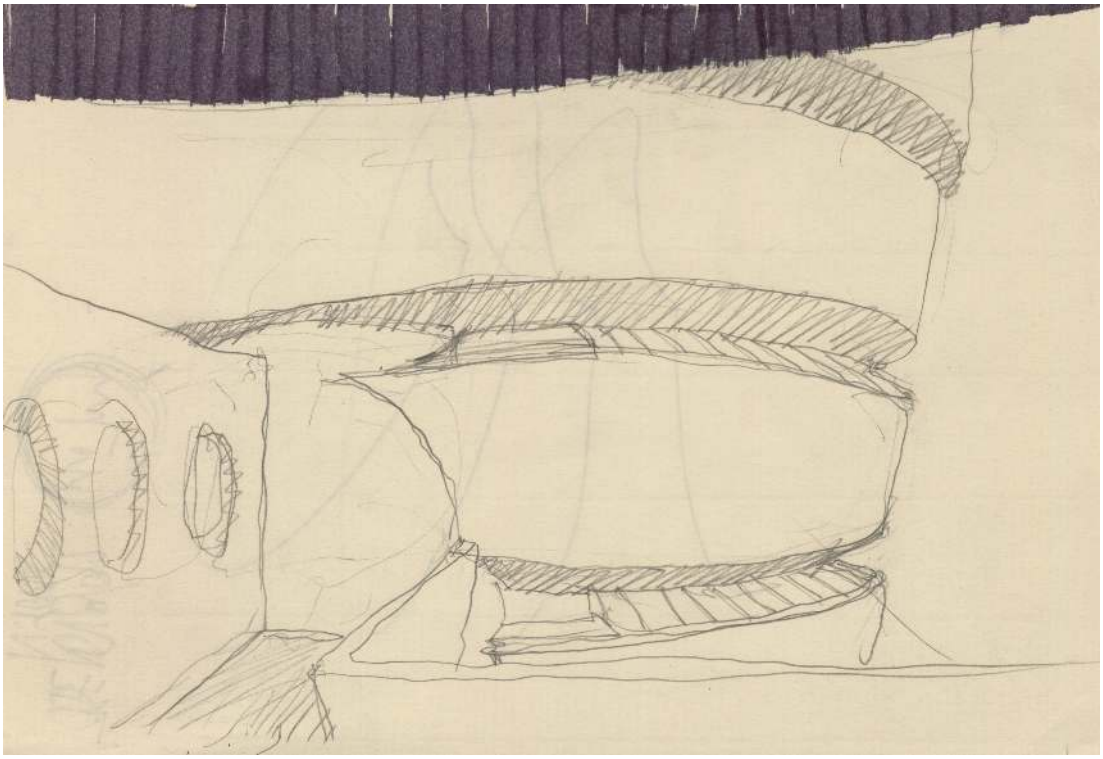


Figura 164: Vista exterior del museo. *Exterior view of the museum.*

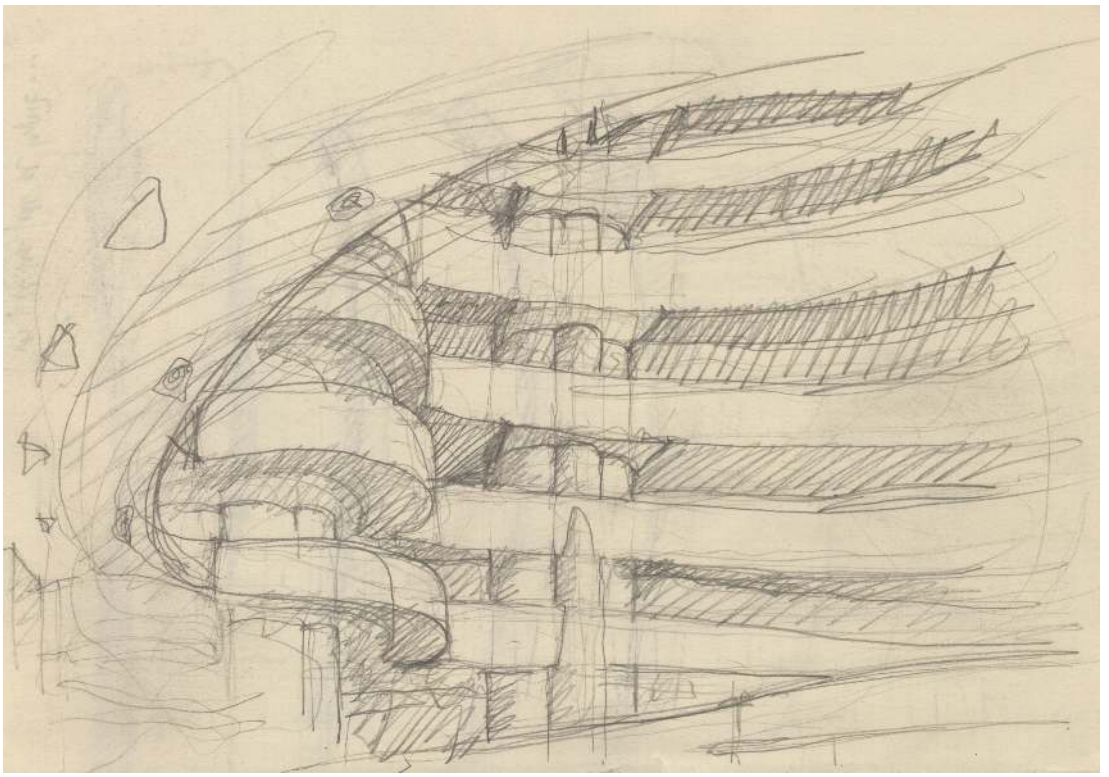


Figura 165: Vista del interior. *Interior view.*

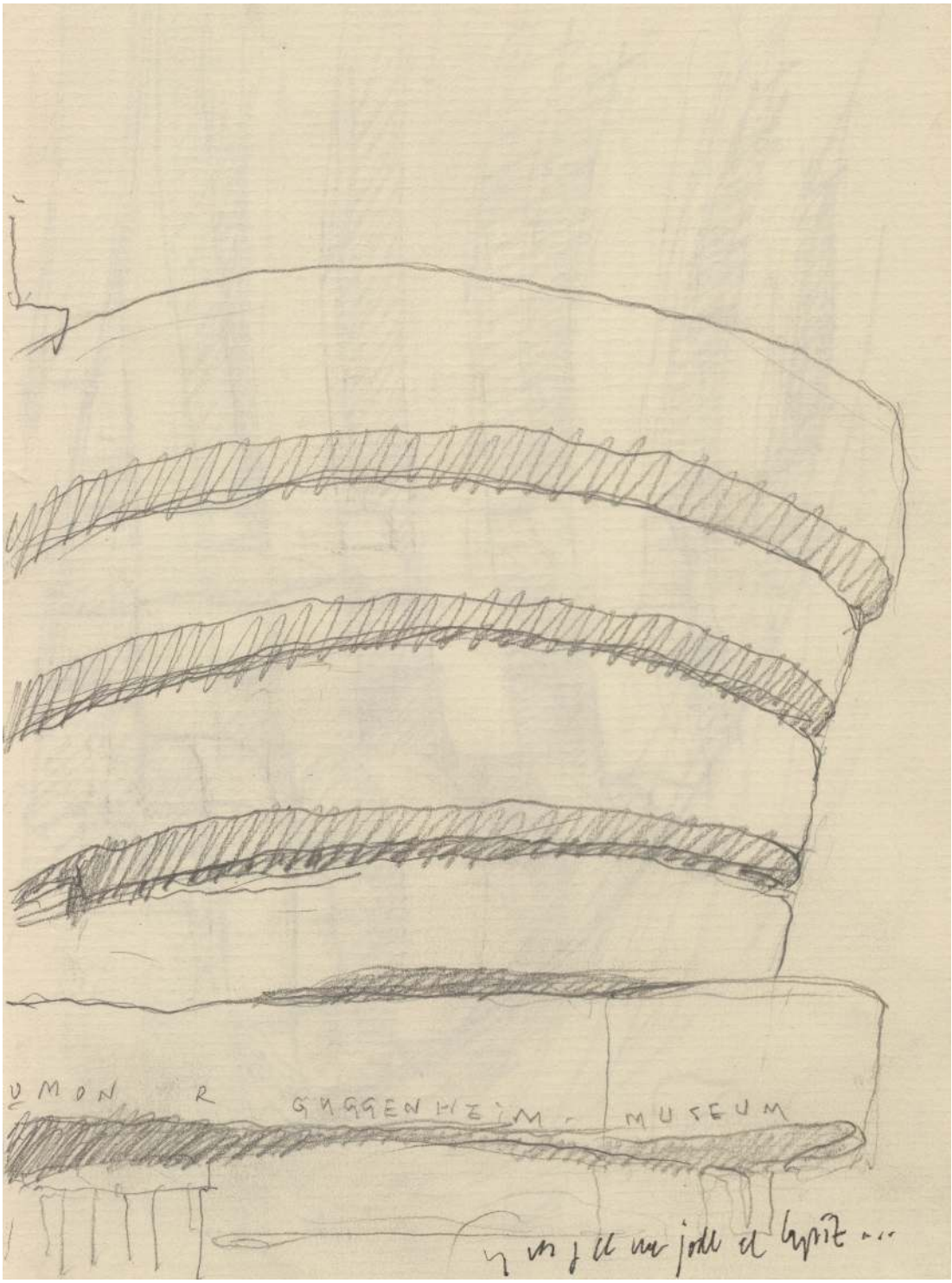


Figura 166: Vista exterior del museo. *Exterior view of the museum.*

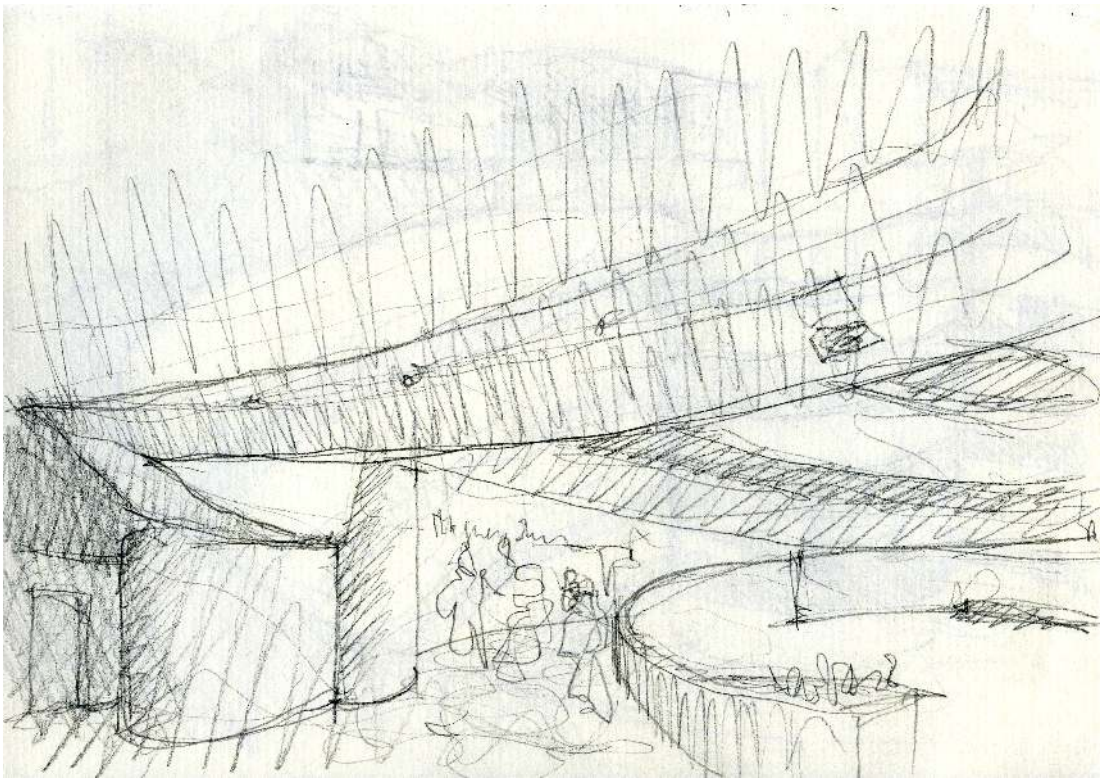


Figura 167: Vista del interior. *Interior view.*

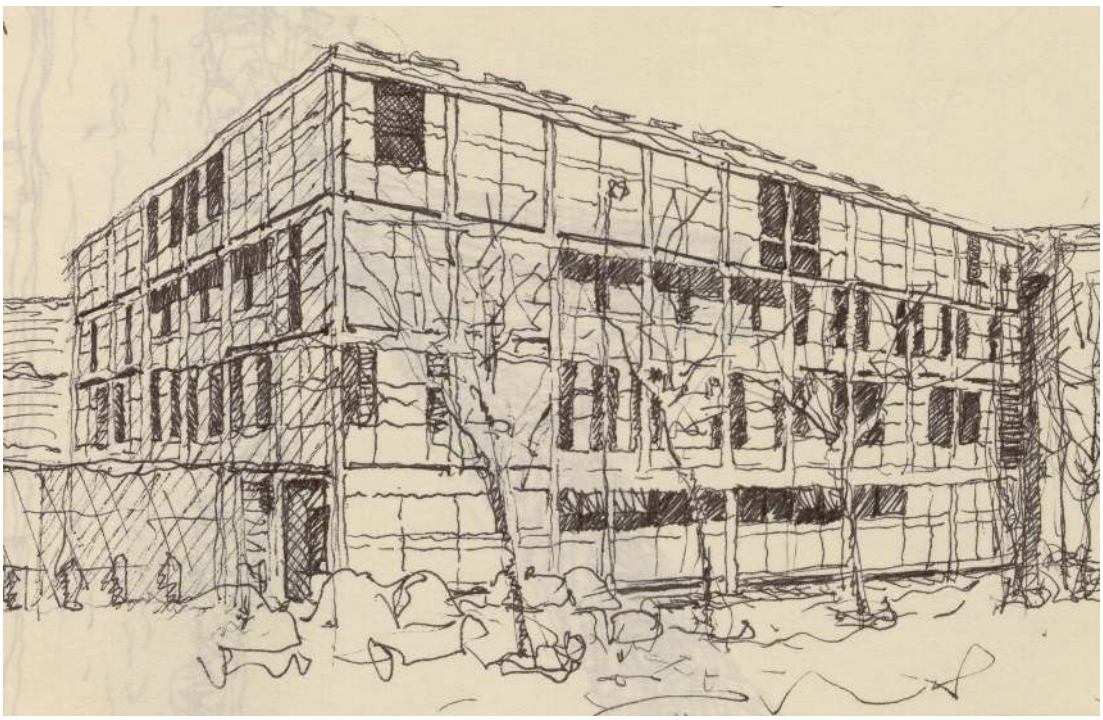


Figura 168: Centro de arte británico en Yale. *Center for British Art*.

Center for British Art

**Center for British Art, Yale:
especially rigid modulation.**

The Center for British Art, in Yale[a], figures 168 and 170, is the last work by the architect Louis Kahn, who died the same year it was finished, in 1974.
It is a spatial grid with 6 × 10 modules in a floor plan of approximately 6 × 6 m per module and in four floors about 3.5 m high.
The use of structure here recalls that by Giuseppe Terragni in the Casa del Fascio (1932-36). But Kahn takes this idea even further and respects the modulation more strictly in the facade as well as the floor plan. But it is not only that the structure is modular, it is that the partitions and walls coincide with the module (except for a stairway that is in a patio). As buildings usually have complex uses this is not normally possible. The building here, a museum, is understood to be a container, and as such it is possible to maintain this rigidity.
The execution of the building is impeccable. The visible concrete grid is finished in steel on the outside and in wood inside. The modular format is kept on the roof, where truncated pyramidal skylights are especially important in both of the interior patios. There is also a concrete grid structure on the roof, based on the module and the shape of the skylights.
A priori this rigid use of modules does not necessarily create something that is especially good. Many magnificent projects have a modular structure that does not extend to the partition walls. Such a radical approach is singular within Kahn's work, which does not mean that this is not an enormously high-quality project.
In many of his finest works Louis Kahn collaborated with the engineer August E. Komendant. These works are magnificent, and structure invariably plays a highly important role in them, always in combination with Kahn's ideas. Their joint work is an example of synergy: and it would deserve specific analysis.

[a]The University Art Gallery, which is also in Yale, is famous for its pyramid-based framework. This is the work that made Kahn famous. But I believe this photograph to be deceptive. The pyramidal "coffer" is too small and complicated to construct. I most definitely prefer the Center for British Art.

**Center for British Art, Yale:
una modulación especialmente rígida.**

El *Center for British Art*, en Yale[a], figuras 168 y 170, es la última obra del arquitecto Louis Kahn, que fallece el mismo año en que se finaliza, 1974.
Es una retícula espacial con 6 × 10 módulos en planta de aproximadamente 6 m × 6 m por módulo y cuatro plantas de unos 3,5 m de alto.
El manejo de la estructura recuerda a lo hecho por Giuseppe Terragni en la Casa del Fascio (1932-36). Pero Kahn lleva más lejos esa idea, es más estricto al respetar la modulación, tanto en fachada como en planta. Pero no es solo que la estructura sea modular, es que las particiones y cerramientos coinciden con el módulo (salvo una escalera exenta en un patio). El uso de un edificio, normalmente complejo, no lo permite. Aquí el edificio, un museo, es entendido como un contenedor, y por eso le es posible mantener esa rigidez.
El edificio tiene una ejecución impecable. La retícula de hormigón visto se colmata con acabados de acero al exterior y de madera al interior. El módulo se mantiene en cubierta, donde aparecen unos lucernarios tronco–piramidales que adquieren especial importancia en los dos patios interiores. Ahí aparece, además, una estructura en emparrillado de hormigón, en cubierta, derivada del módulo y de la forma de los lucernarios.
Esa rigidez en el uso del módulo no creo que sea, a priori, algo especialmente bueno. Muchos proyectos magníficos tienen una estructura modular que luego no se arrastra a las particiones. Dentro de la obra de Kahn, esta postura tan radical es singular. Lo que no quiere decir que no sea un proyecto de enorme calidad.
Louis Kahn trabajó en muchas de sus mejores obras con el ingeniero August E. Komendant. Son magníficas, y la estructura tiene un papel muy relevante, siempre fundida con las ideas arquitectónicas de Kahn. Su trabajo conjunto es ejemplo de sinergia; y merecería un análisis específico.

[a]La *University Art Gallery*, también en Yale, es famosa por su forjado de base piramidal. Es una obra que le proyecta a la fama. Pero creo que la foto engaña. El "casetón" piramidal es demasiado pequeño, complejo de construir. Me quedo con el *Center for British Art*, sin dudarlo.

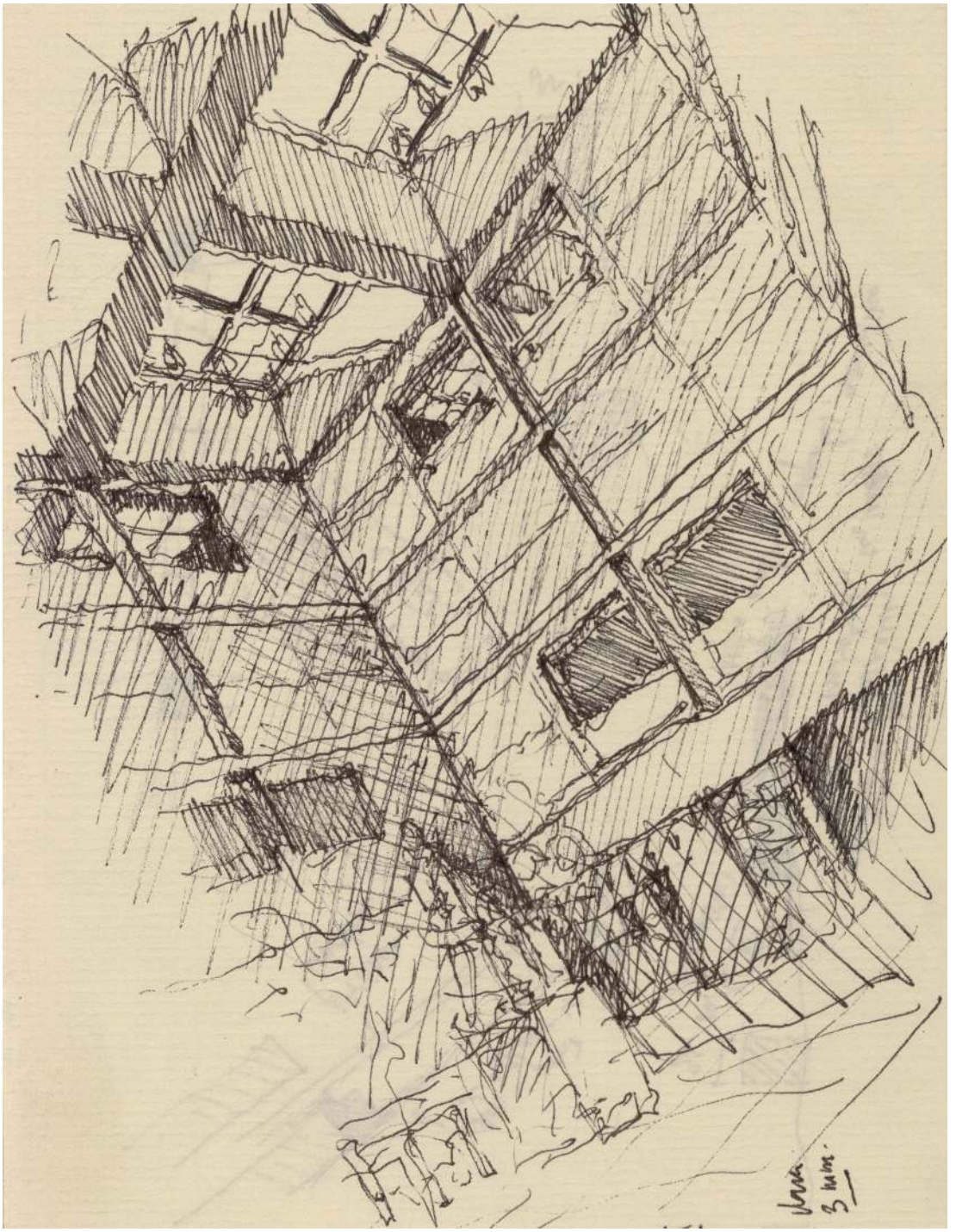


Figura 169: Vista de uno de los patios. *View of one of the interior courts.*

Figura 170: La casa del Fascio de Terragni. *Casa del Fascio by Terragn.*

Figura 171: Capilla en Otaniemi, vista exterior. *Exterior view of Otaniemi chapel.*

Figura 172: Cerchas de cubierta. *Covert truss.*

Capilla de Otaniemi

Otaniemi chapel:
traditional elements used masterfully.

The chapel in Otaniemi university campus (1957), Finland, figure 171, is by the architectural couple Kaija and Heikki Siren, "The Siren".
This architecture is composed of traditional elements, conceptually as well as in its construction. This includes the use of an atrium, a patio, screens, how light is handled and the inclusion of the natural world around it. Such as the thoroughly Scandinavian wooden fence or the wood and steel arched beam. Although this is a quiet work, it finally achieves great intensity.
A single plane roof opens up to let the light in, sloping steeply as it should in Finland to prevent snow from building up. This led directly to the choice of the arched beam and its pattern, as this is one of the most classical possibilities. However, this is not of course the only option, figure 172.
There are lots of options. It would in fact be cheaper now to use laminated wooden beams on their sides. And moreover there are more efficient arched beam designs. But we are talking about minimum savings here. A use such as this allows for a certain degree of margin in these decisions.
Once an arched beam had been selected as standard, the use of wood is a natural option, too. As is the use of steel for the diagonals, which simplifies the joining system. But it also emphasises the verticality of the uprights, which broken down also display complete constructive logic. Everything points to great expertise in the use of wood, more so than may be visible to the untrained eye.
There is great expertise in this construction and its structure. But this building is high quality religious architecture, and that is its definitive final aim.

Capilla en Otaniemi:
Elementos tradicionales usados con maestría.

La capilla situada en el campus universitario de Otaniemi (1957) en Finlandia, figura 171, es obra de la pareja de arquitectos Kaija y Heikki Siren, "los Siren".
Es una arquitectura hecha de elementos tradicionales, tanto en lo conceptual como en lo constructivo: El uso del atrio, del patio, de filtros, el manejo de la luz o la incorporación de la naturaleza circundante; como esa valla de madera tan nórdica o la cercha de madera y acero. Obra serena, pero, finalmente, de gran intensidad.
Un simple plano de cubierta se abre para dar luz, con gran pendiente, como es recomendable en Finlandia para no acumular nieve. A partir de ahí la elección de la cercha y su esquema es directo, una de las posibilidades más clásicas. Pero desde luego no la única opción, figura 172.
Hay muchas. De hecho, sería más barato, al menos hoy, recurrir a unas vigas de madera laminada de canto. Y además hay esquemas de cercha más eficientes. Pero hablamos de un ahorro mínimo. Un uso como este puede permitirse un cierto margen en esas decisiones.
Elegida la cercha como tipo, el uso de la madera es también una opción natural. Al igual que lo es utilizar acero en las diagonales, que simplifica el sistema de unión. Pero, además, remarca la verticalidad de los montantes, cuyo despiece es también de una lógica constructiva aplastante.
Todo indica un gran oficio en el uso de la madera, más de lo que pueda parecer a ojos profanos.
Hay muchísimo oficio en la construcción y la estructura. Pero ese oficio acompaña a una arquitectura religiosa de calidad, y ese es, en definitiva, el objetivo final.

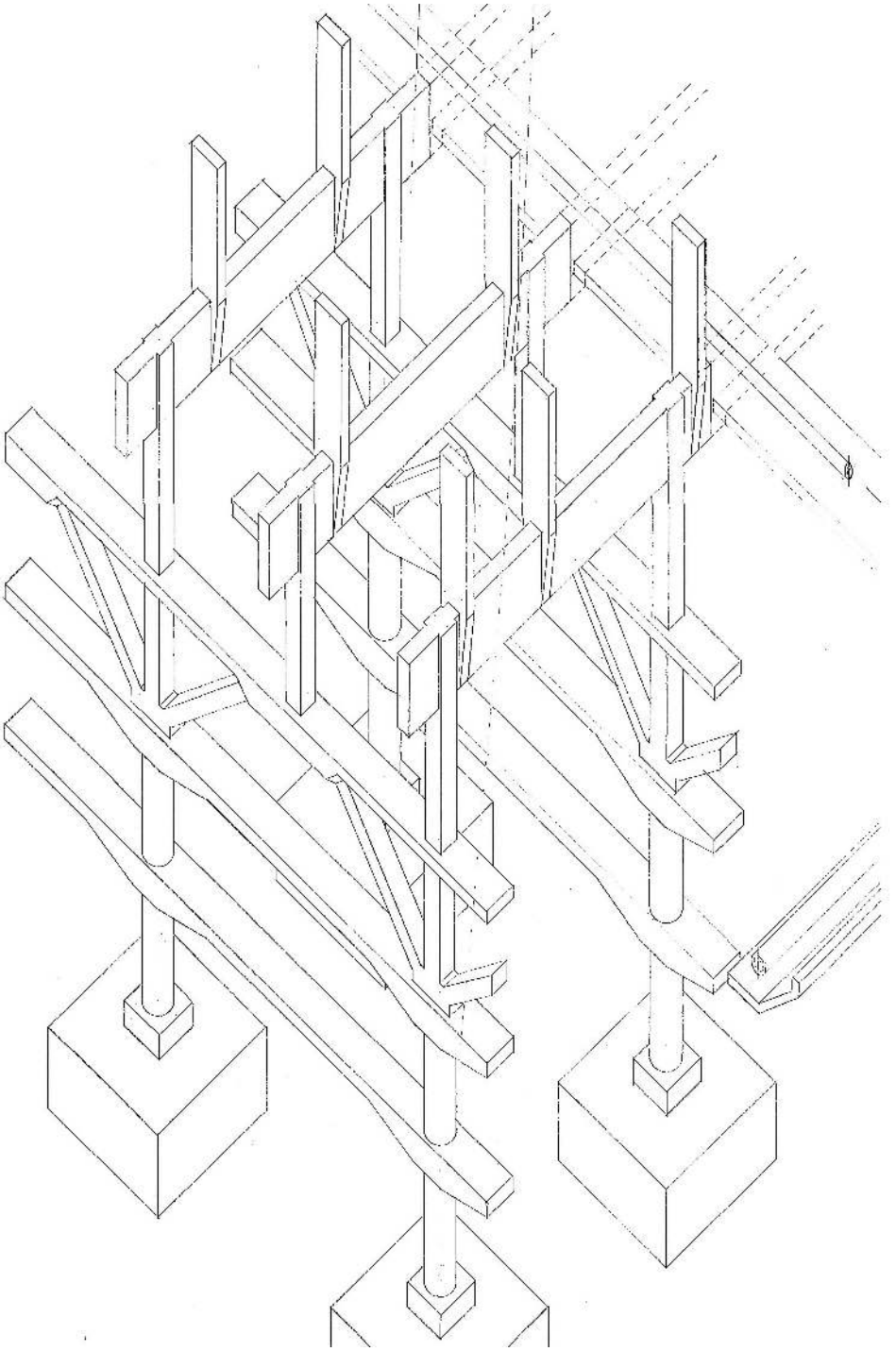


Figura 173: Viviendas en Rafael Calvo, esquema del cambio de modulación, en dos etapas

Vivienda colectiva en Rafael Calvo

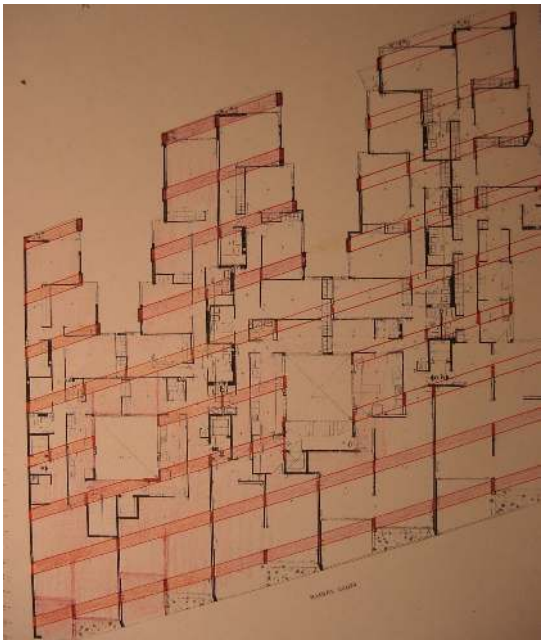
Blocks of flats in Rafael Calvo and Núñez de Balboa:
two different strategies for a change of modulation

This section will describe two blocks of flats, both designed by the architect Ricardo Aroca. The first of these is located in calle Rafael Calvo 9, figure 174, and the second is in calle Núñez de Balboa 12, figure 176, both of which are in Madrid.
Their similarities mean that it is worthwhile examining them together. Although both of them involve a change of modulation in their structure, they use different strategies to do so.
Rafael Calvo is where Ricardo Aroca first changed the modulation between the structure of the homes and that of the garage in a block of flats. He therefore assumed that no single feasible solution can be found for both uses, so that a change of span is required.
The flats floor plan, figure 175, is closed on the street side and open to the patio of the block. The strategy of the flats' structure is to place beams parallel to the facades, which are coloured red in the floor. This fits perfectly with the distribution. We should not forget that in homes good distribution is the first thing to achieve, and this is not usually at all simple, after which a structure is "fitted" to it. The strategy of changing the modulation aids this fitting and makes it more worthwhile.

Vivienda colectiva en Rafael Calvo y Núñez de Balboa: dos estrategias distintas para un cambio de modulación.

En este apartado se van a describir dos casos de vivienda colectiva, ambas diseñadas por Ricardo Aroca. La primera localizada en la calle Rafael Calvo 9, figura 174, y la segunda en la calle Núñez de Balboa 12, figura 176, ambas en Madrid.
Sus similitudes hacen que merezca la pena verlas conjuntamente. En ambas hay un cambio de modulación en la estructura, pero se usan estrategias distintas.
En las viviendas de Rafael Calvo Ricardo Aroca plantea, por primera vez en la vivienda colectiva, el cambio de modulación entre estructura de vivienda y garaje. Se asume, por tanto, que no es viable conjugar una buena solución que sirva para los dos usos, y que entonces es rentable plantear un cambio de luces.
La planta de viviendas, figura 175, tiene una organización cerrada a la calle y abierta al patio de manzana. La estrategia de la estructura en viviendas consiste en disponer vigas paralelas a fachada, coloreadas en rojo en la planta, lo que encaja perfectamente con la distribución. No olvidemos que en vivienda uno hace primero una buena distribución, cosa nada sencilla normalmente, y luego se "encaja" una estructura. La estrategia de cambio de modulación facilita ese encaje y lo hace más rentable.

Figura 174: Viviendas en Rafael Calvo, fachada a calle (izqd.) y vista parcial de fachada trasera.
Flats in Rafael Calvo, the street facade (left) and a partial view of the rear facade (right).



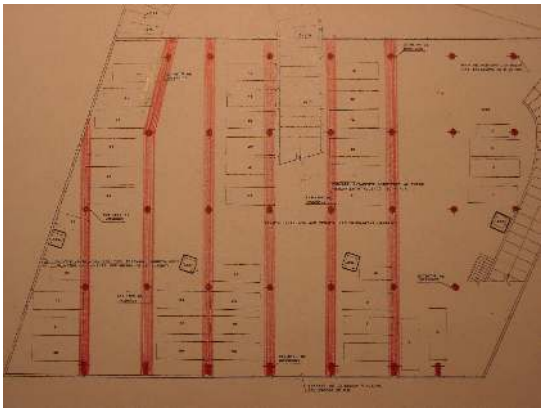


Figura 175: Planta tipo de viviendas (izquierda) y de garage (derecha).
Standard floor plan of flats (left) and of the garage (right).

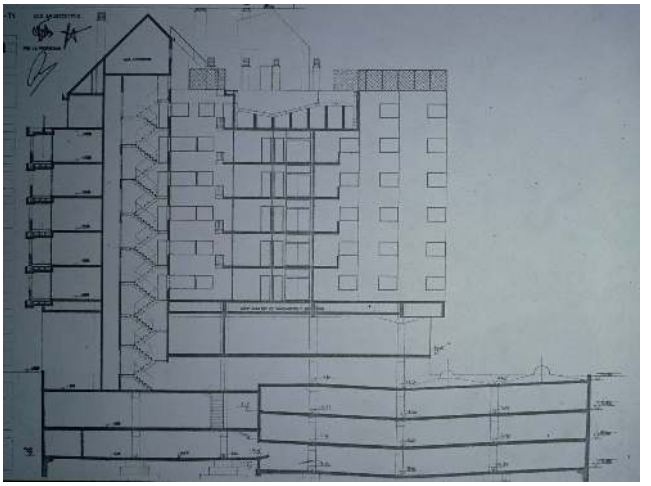


Figura 176: Sección transversal de las viviendas en Núñez de Balboa, con el cambio de modulación en el techo de planta primera.
Cross section of the flats in Núñez de Balboa, with the change of module in the first floor.

El cambio de modulación se realiza en dos etapas, figura 173: los soportes de vivienda se apean, en techo de planta primera, usando vigas de canto de aproximadamente 1 m. En planta primera se disponen soportes verticales sobre la líneas de pórticos del garaje, y esos pilares se apean usando arcos que ocupan todo el canto de la planta baja.
El canto dado a las vigas de techo de primera planta se usa para crear una cámara registrable por donde se conduce todo el saneamiento de la planta de vivienda hacia la fachada principal.
En el caso de las viviendas de Núñez de Balboa, también de Ricardo Aroca, figura 176, posteriores, todo el cambio de modulación se realiza con vigas de canto en techo de primera, donde también se recoge todo el saneamiento de viviendas hacia la calle. Ello implica vigas y brochales de canto, pero se simplifica dicho cambio.
Existe, por tanto, una evolución. El primer caso es más atractivo formalmente; pero dado el número de plantas, es posible hacerlo más simple. La solución de Núñez de Balboa será empleada después en las viviendas en Fuencarral (véase la página 173).
En ambos casos, el cambio de modulación permite una estructura simple y eficaz, tanto en planta de vivienda como en planta de garaje.

The change of modulation takes place in two stages, figura 173: The supports of the homes are braced in the first floor ceiling by beams approx. 1 m. wide. There are vertical supports in the first floor over the garage lines of porticos, and these pillars are braced using arches that occupy the whole width of the ground floor.
The width of the first floor ceiling beams is used to create a duct that can be opened and which contains all of the drains from the floors of flats to the main facade.
In the case of the block of flats in Núñez de Balboa, figure 176, which were built at a later date, the whole change of modulation takes place using edge beams in the first floor ceiling, which also contains all of the drains from the flats to the street. This involves using edge beams and header beams, although this simplifies the said change.
An evolution therefore took place. The first case is formally the most attractive; but given the number of floors, it is possible to make it simpler. The Núñez de Balboa solution is the one that was also used in Fuencarral (see page 173).
In both cases the change of modulation made it possible to use a simple and effective structure in the homes' floors as well as in that of the garage.

Figura 177: Viviendas en Arturo Soria, vista del patio de manzana.
Arturo Soria homes, view of the block patio.

Figura 178: Vista de la planta baja.
View of the ground floor.

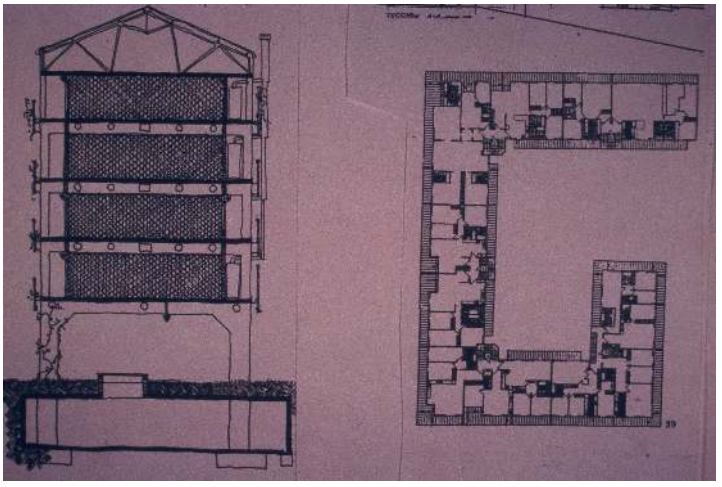


Figura 179: Sección tipo y planta general.
Standard cross-section and floor plan.

Vivienda colectiva en Arturo Soria

Block of flats in Arturo Soria: an interior free of structure.

Block of flats in Arturo Soria, Madrid, figures 177 and 178, is by Ricardo Aroca and José Miguel de Prada Poole.
The structural strategy in these homes, 179, with a span of 12.5 m between the supporting walls, is to locate the supports in the facades by using edge beam porticos, leaving the interior completely free of supports.
This takes advantage of the fact that the town planning rules did not involve any major restrictions on the height of each floor of these flats. The strategy used here would not be feasible with most current planning regulations because it would strongly penalise promoters by restricting the amount of a plot of land that they could build on, causing the final price to rise. In practice this nearly always makes this strategy unviable.
The greater width of the beams is used to make the distribution of the homes completely flexible. A large false ceiling for distributing all of the services, especially ventilation, is created. There is therefore complete freedom in deciding where to place bathrooms, which are ventilated through the false ceiling and ducts in the facade. The supports go directly down to the garage. Another major advantage here, Figure Error: no se encontró el origen de la referencia, is that the area in the ground floor can be used. Using spans of this type does not involve a large increase in the total costs of the structure. And in return, the flexibility obtained makes homes easy to adapt if they change occupier or their occupier's needs change, something that is increasingly common. All it needs are town planning regulations which allow it.

Vivienda colectiva en Arturo Soria: la crujía libre de estructura.

Vivienda colectiva en Arturo Soria, Madrid, figuras 177 y 178, es obra de Ricardo Aroca y José Miguel de Prada Poole.
La estrategia de la estructura en estas viviendas, figura 179, con una crujía de 12, 5 m, es la de situar soportes en las fachadas gracias al uso de pórticos con vigas de canto, dejando totalmente libre de soportes el interior de la crujía.
Se aprovecha que la normativa urbanística no limitaba excesivamente la altura de cada planta de vivienda. Con la mayoría de la normativa actual, esta estrategia no sería viable porque podría penalizar mucho al promotor al reducir el aprovechamiento del solar. Y, con ello, subir el coste final, lo que, en la práctica, lo convertiría en inviable casi siempre.
El mayor canto de las vigas se aprovecha para dar una total flexibilidad a la distribución de las viviendas, creando para ello un gran falso techo de reparto de instalaciones, en particular de ventilación. Hay, por tanto, libertad total para situar los baños, cuya ventilación se lleva, desde los falsos techos, a conductos en fachada.
Los soportes continúan directamente hasta garaje. El aprovechamiento del espacio en planta baja es otra gran ventaja.
Utilizar luces de este tipo no supone una gran repercusión en el coste total de la estructura. A cambio, la flexibilidad obtenida facilita la adaptación ante el cambio de usuario o de sus propias necesidades, algo cada vez más frecuente. Sólo hace falta una normativa urbanística que lo facilite.

Figura 180: Viviendas en Fuencarral, vista aérea general. *Flats in Fuencarral, aereal view.*

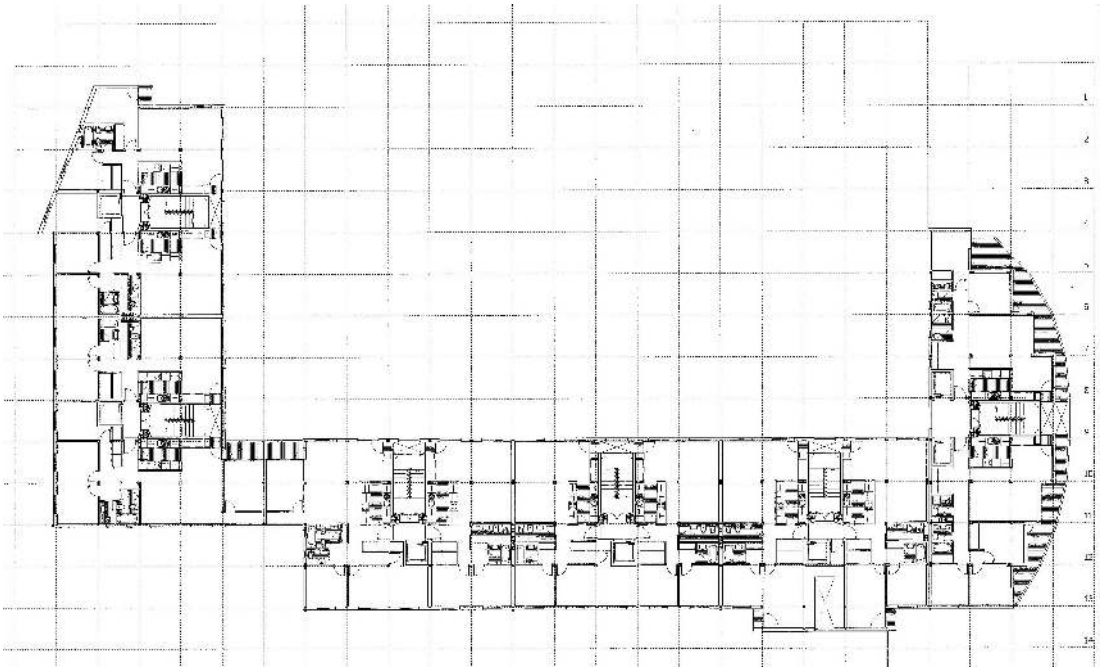


Figura 181: Planta de viviendas. *General plan.*

Vivienda colectiva en Fuencarral

Blocks of flats in Fuencarral: minimum spans with a change of modulation.

These blocks of flats in Fuencarral, Madrid, (2000-03), figure 180, are the work of the architect Ricardo Aroca.
The car park has 215 spaces and is located in two and a half floors underground. It is used by those who live in the adjacent area as well as those who live in these apartments.
Edge beams are visible in the ceilings of the shops on the ground floor, showing the change in modulation between the structure of the homes and the garage. The first four floors contain 3 and 4 bedroom flats, while the top two floors are duplex flats. There are a total of 63 homes.
The arrangement of volumes here is due to town planning requirements, creating a square in front of Sanchonuño street, which leads to the centre of Fuencarral.
All of this work is based on a 3 m × 3 m module, which is broken at the edges to adapt, as was pointed out above, to the urban landscape. In the flats, figures 181 to 182, metal supports follow this minimum 3 m × 3 m grid pattern, which is quite out of the ordinary and almost becomes an exercise in minimum spans.
The floor slabs are solid and 15 cm thick. They are very strong and offer good acoustic insulation, while they are only slightly more expensive than traditional floor materials. Triangular braces are used, figure 183.

Vivienda colectiva en Fuencarral: luces mínimas con cambio de modulación

Este edificio de vivienda colectiva de protección pública en Fuencarral, Madrid (2000-03), figura 180, es obra del arquitecto Ricardo Aroca.
El aparcamiento, con 215 plazas, se sitúa en dos plantas y media bajo rasante, sirviendo no solo al propio edificio sino dando también apoyo a las viviendas más próximas.
En el techo de los locales comerciales, en planta baja, aparecen unas vigas de gran canto que realizan el cambio de modulación entre la trama estructural de vivienda y garaje. Las cuatro primeras plantas son de viviendas de 3 y 4 dormitorios, y las dos últimas son dúplex. Hay un total de 63 viviendas.
La organización de los volúmenes responde a criterios urbanísticos, creándose una plaza frente a la calle Sanchonuño que conduce al centro de Fuencarral.
Toda la intervención se apoya en un módulo de 3 m × 3 m, que se rompe en los bordes para adaptarse al tejido urbano. En las viviendas, figuras 181 a 182, se sitúan soportes metálicos siguiendo esa trama mínima, 3 m × 3 m, algo nada usual y que se convierte casi en un ejercicio de luces mínimas. El forjado se resuelve ahí con una placa maciza de 15 cm, una solución de gran calidad resistente y acústica, y de un coste solo algo superior al de los forjados tradicionales. El arriostramiento se hace por paños triangulados, figura 183.

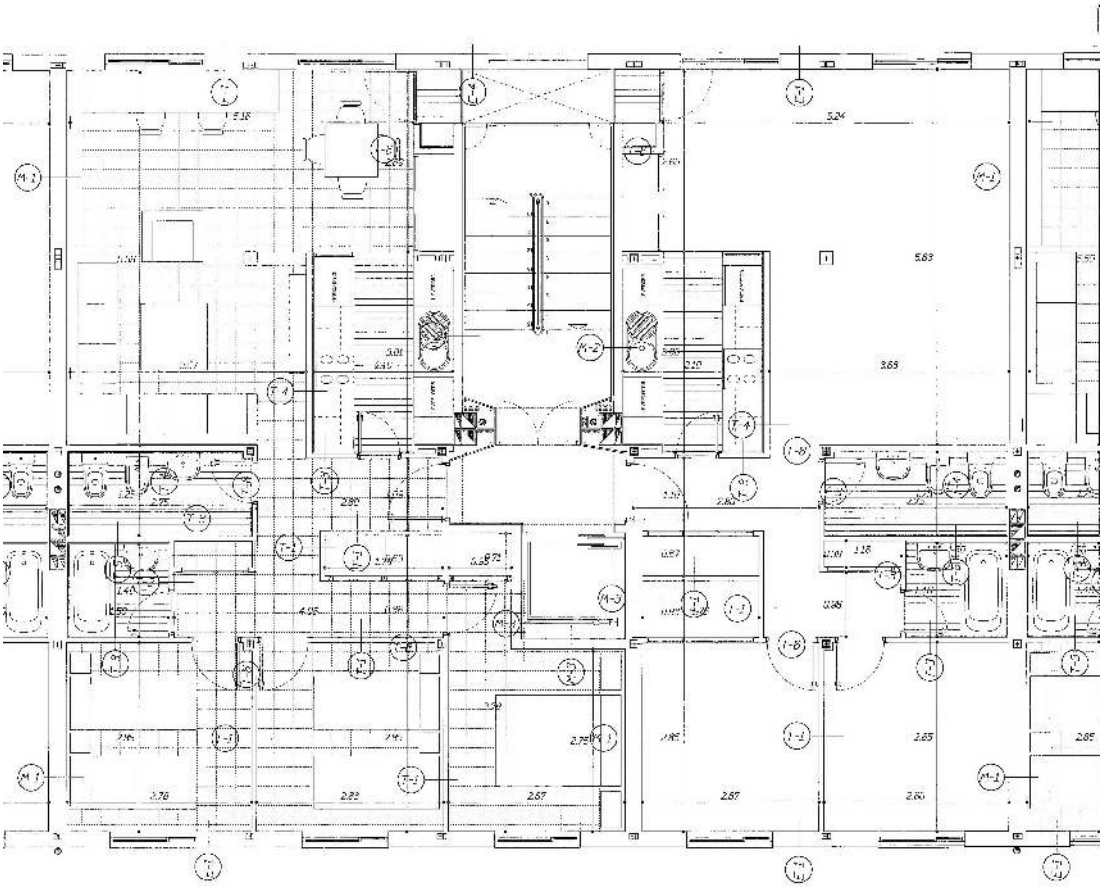


Figura 182: Planta de vivienda tipo.
Plan floor.

The 3 m × 3 m modules are also used in the garage, figures 183 and 184, but with maximum spans of 6 m two modules. The floors here are 20 cm thick slabs with thicker ribs that are continuously bracketed. The garage is divided into half-floors, which optimises the space for ramps, with a dual system, one of which is fast access.

The modulation of the structure therefore changes, figure 185. As was pointed out above, this change occurs in the roof edge beams (of approx. 80 cm) in the ceiling of the ground floor premises. This location is compatible with the greater height of these premises.

This change of modulation gives rise to a good structure, in the homes as well as in the garage. If there were no change, one of these parts would be negatively affected. In this case the change of modulation is made using edge beams, although if necessary other stronger solutions can be used, such as angled supports.

The narrow span of the building's structure, 3 m × 3 m, almost makes this work a minimalist manifesto. It reminds me of the Catálogo de Puentes de Altura Estricta ("Catalogue of Strict Height Bridges") by Carlos Fernández Casado.

This building was awarded the Community of Madrid prize for Aesthetics in the Residential Buildings category, in 2005.

El módulo de 3 m × 3 m alcanza el garaje, figuras 183 y 184, pero con luces máximas de 6 m, dos módulos. Los forjados ahí son losas de 20 cm con nervios de más canto acartelados de forma continua. El garaje se organiza en medias plantas, lo que optimiza el espacio destinado a las rampas, con un doble sistema, una de acceso rápido.

Hay, por tanto, un cambio de modulación de la estructura, figura 185, que, como se ha dicho, se sitúa en las vigas de canto (de unos 80 cm) de techo en los locales de planta baja. Esa ubicación es compatible con la mayor altura de los locales.

Gracias a este cambio de modulación se consigue una buena estructura, tanto en vivienda como en garaje. De otro modo hay siempre alguna de las partes que sufre. En ese caso el cambio de modulación se ha hecho con vigas de canto, pero si fuese necesario se pueden usar soluciones más potentes, como soportes inclinados.

La reducida luz de la estructura de la vivienda, 3 m × 3 m, convierte a la obra en casi un manifiesto en torno a mínimos. Me recuerda al *Catálogo de Puentes de Altura Estricta* de Carlos Fernández Casado.

La obra recibió el premio de la Comunidad de Madrid a la *Estética* en la categoría de *Edificios de Carácter Residencial* en el año 2005.

Figura 183: Losas de las viviendas tipo (izqda.) y del garaje (drcha). *Floor slabs of the standard homes and of the garage (right).*

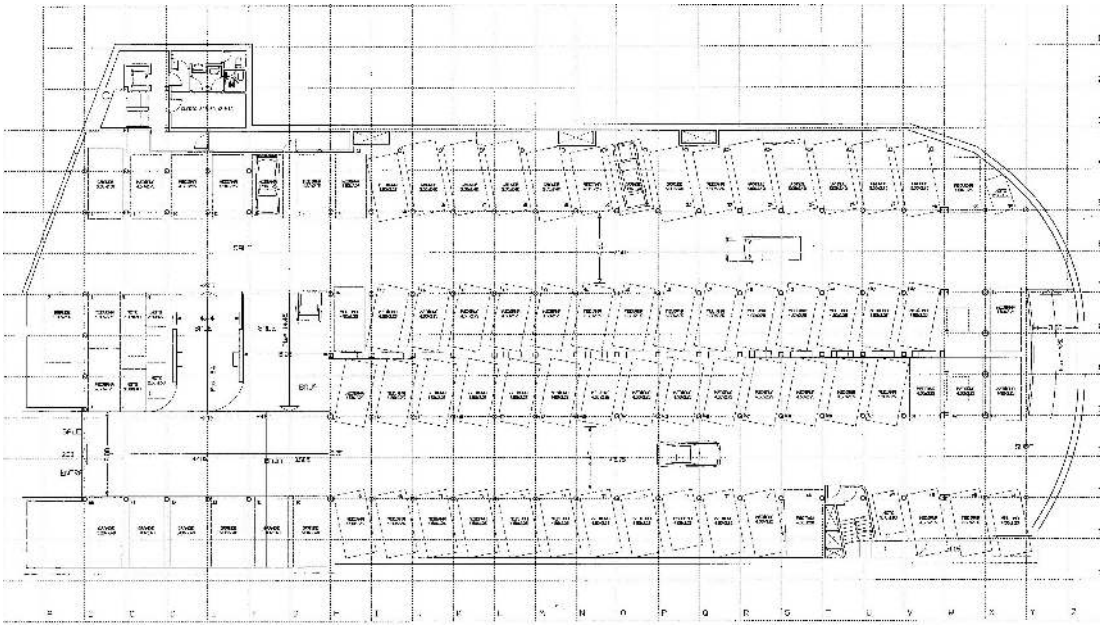


Figura 184: Planta de garaje. *Garage plan.*

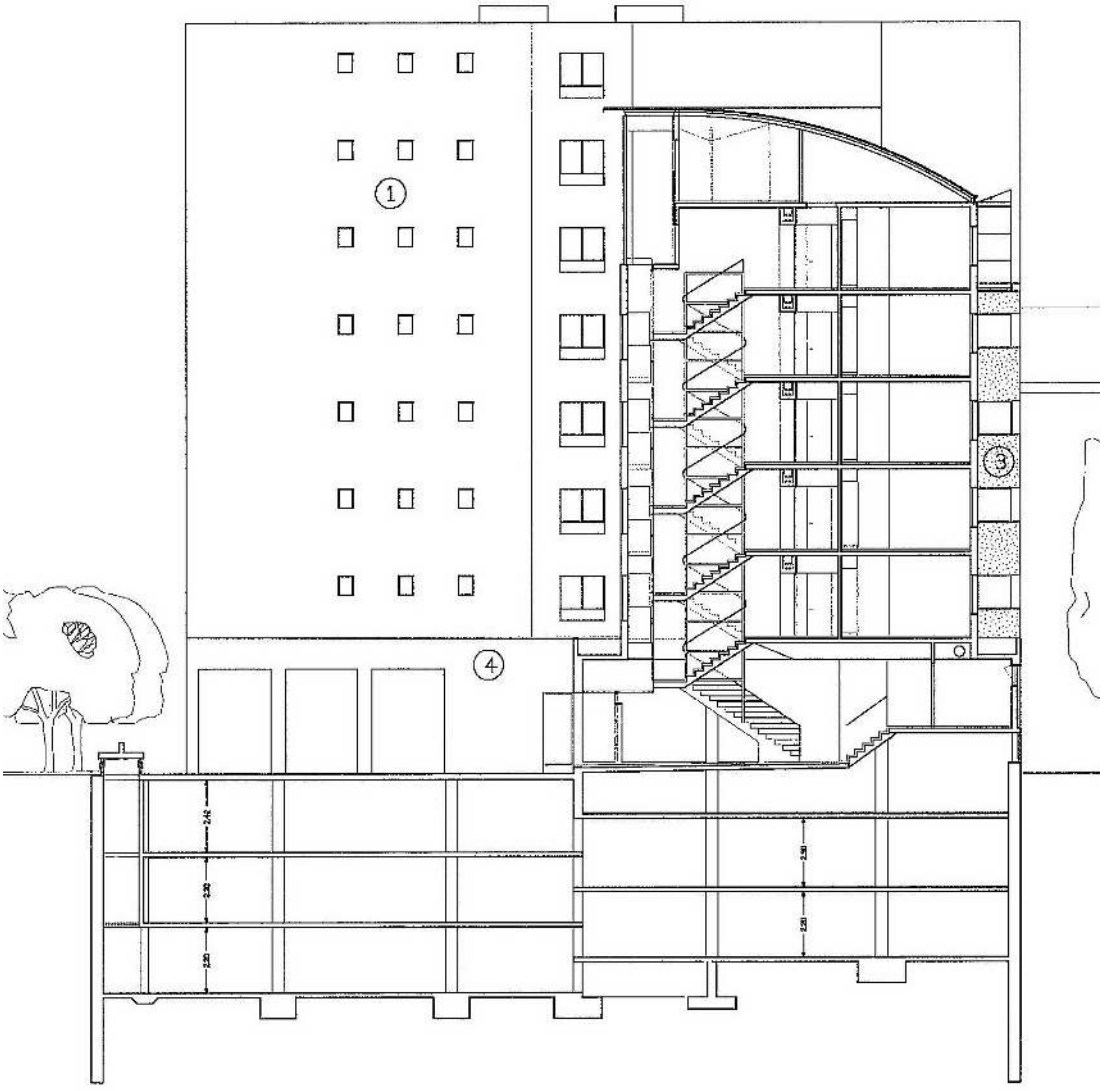


Figura 185: Sección transversal en que se aprecia el cambio de modulación en planta baja.
Cross section in with change of modul can be seen.

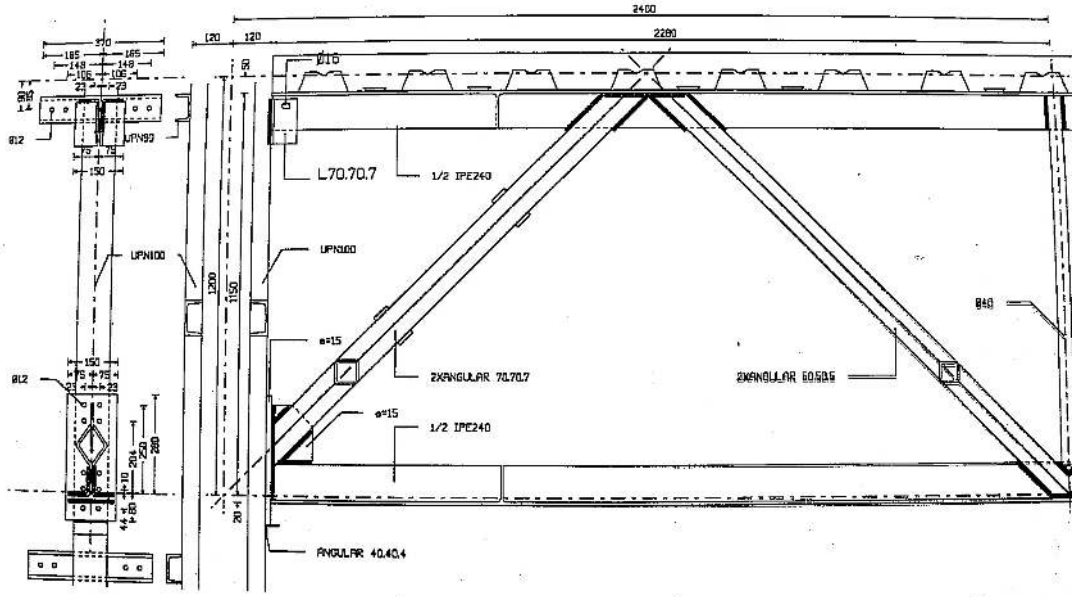


Figura 186: Edificio de Industriales, cercha tipo de 15 m de luz.
Standard beam spanning 15 m.

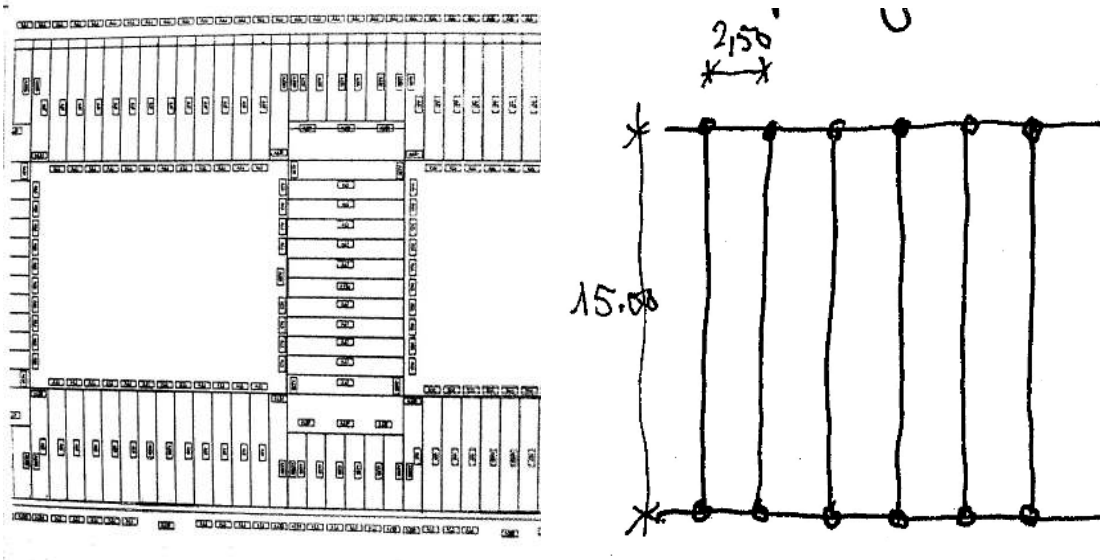


Figura 187: Planta Edificio de Industriales, Univ. Carlos III en Leganés.
Floor plan of the Industrial Engineering Building, Carlos III University, Leganés.

Edificio de Industriales, Universidad Carlos III, Leganés

The Industrial Engineering Faculty Building, Carlos III University, Leganés: an example of modulation, arched beams and joint details.

The architects Gerardo Salvador Molezún and José Ramón Menéndez Luarca designed several of the buildings in the Leganés campus of Carlos III University at the end of the 1990s. The structure is the work of the architect Ricardo Aroca.
This architecture is very high quality, functional and composed; it also has a more symbolic element, as its use and urban setting demand. Although it contains brickwork, which alludes to the local area, this building has modern dimensions. This is architecture that will be confirmed by the passage of time.
Here we will centre only on the building of the Higher Technical School of Industrial Engineers, figures 186 and 187, with standard open areas inside spanning 15 m. The structure is resolved without the use of intermediate pillars by means of 1 m wide arched steel beams placed 2.5 m apart. The beams are connected to the 11 cm thick composite slab (plate with 6 cm) ribs by Nelson connectors. I.e., they are mixed beams.
What is this structural modulation based on? The first decision is the choice of floor, composite slab. These floors are very fast to construct at a reasonable cost, especially in large surfaces such as here. They are especially suitable for metal structures, as they facilitate mixed connection to the floor.
The total floor thickness of 11 cm is a constructive minimum that makes it possible to cover spans of about 2.5 m without using temporary supports during concreting. This is the reason for the spacing of the beams.
The second decision, which is not obvious at all, is to transmit the load directly to the supports, without any intermediary. Although this is best in economic terms, it means that the beams must be of sufficient width, which the project permits: 1 m wide edges, with a slenderness of 15.
What would happen if the beams were 5 m apart? The unitary consumption of beams would be the same, because they cross the same span, but tie beams would have to be added. As simple as that. Or almost.

Edificio de Industriales, Carlos III en Leganés: ejemplo de modulación, trazado de cerchas y detalles de unión.

Los arquitectos Gerardo Salvador Molezún y José Ramón Menéndez Luarca diseñan varios de los edificios del Campus de Leganés de la Universidad Carlos III a finales de los 90. La estructura la desarrolla el arquitecto Ricardo Aroca.
Se trata de una arquitectura de enorme calidad, funcional y serena; con algún elemento simbólico, como demanda el uso y el contexto urbano. Se hace un uso del ladrillo que alude a lo local pero con una dimensión, al mismo tiempo, moderna. Una arquitectura que el paso del tiempo corrobora.
En este apartado nos centraremos solo en el edificio de la ETS de Ingenieros Industriales, figuras 186 y 187, con unas crujías tipo de 15 m.
La estructura se resuelve sin pilares intermedios con cerchas de acero de 1 m de canto, separadas 2,5 m. Las cerchas tienen una conexión al forjado de chapa colaborante de 11 cm de canto (chapa con 6 cm de resalto) mediante conectores tipo *Nelson*. Es decir, son vigas mixtas.
¿En qué se basa la modulación de la estructura? La primera decisión es la elección del forjado, de chapa colaborante. Son forjados que permiten una ejecución muy rápida a un coste razonable, en especial con grandes superficies como esta. Su uso es, además, especialmente adecuado cuando la estructura es metálica, ya que facilita la conexión mixta al forjado.
El espesor total de 11 cm del forjado es un mínimo constructivo que permite salvar luces del orden de 2,5, sin apeos temporales en fase de hormigonado. De ahí la separación de las cerchas.
La siguiente decisión, nada obvia, es llevar la carga directamente a los apoyos, sin otro orden intermedio. Esto es lo más rentable, pero para ello hace falta disponer de un canto adecuado en las vigas, cosa que el proyecto permite: 1 m de canto, una esbeltez de 15.
¿Qué pasa si se separan las cerchas a 5 m? Que el consumo unitario de las cerchas es idéntico, porque salvan la misma luz, pero se añade el consumo de unas viguetas. Tan simple como eso, o casi.

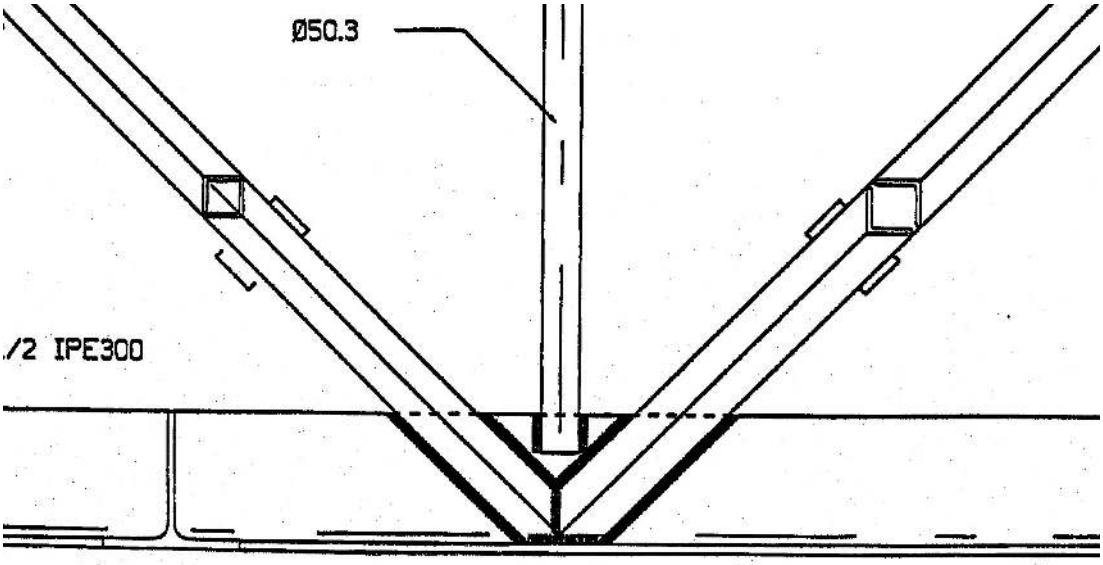


Figura 188: Detalle tipo de unión entre diagonales y cordones en la cercha.
Detail of standard joint between diagonals and booms in the beam.

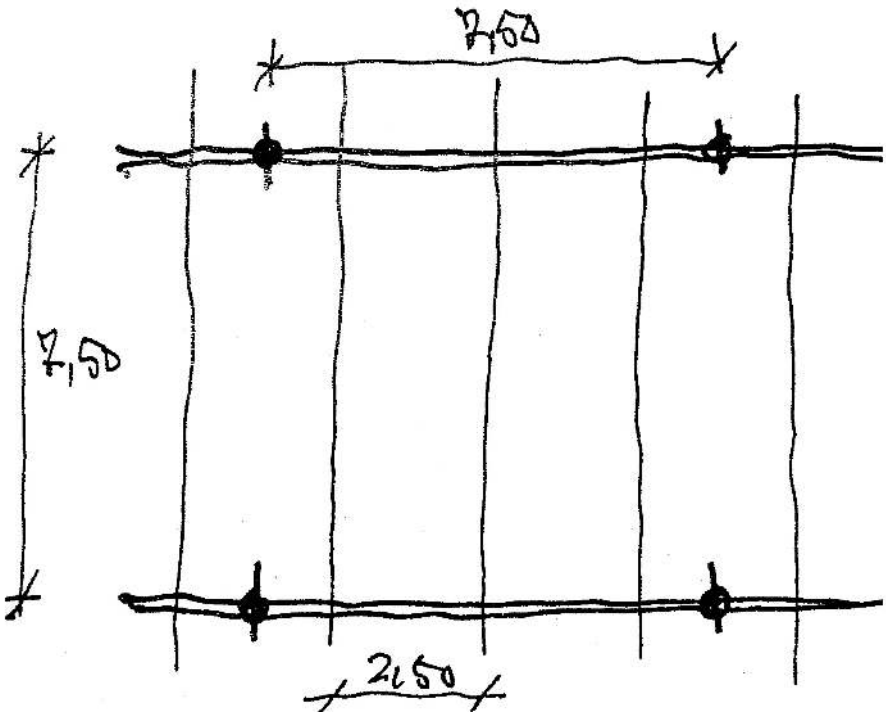


Figura 189: Modulación de 7,5 m de luz con dos ordenes y perfiles doble T en continuidad.
Modulation with a span of 7.5 m *with two orders of double T-sections in continuity.*

If the span to be crossed increases, the unit cost of the structure does so too in comparison with standard measurements. Thus for example, if a span of 50 m has to be crossed, it is worthwhile to increase the separation of the primary structure and use the secondary tie-beams which are omitted here.

The slenderness of 15 means that this design is conditioned by resistance rather than rigidity, a key question. If the slenderness is increased then the cost increases in a non-lineal way, something that should be avoided if there is room enough for large edges, as is the case here.

The triangulation of the beams, with diagonals at 45° to the booms, requires minimum consumption. Struts are added to increase the rigidity of the upper boom, figures 186 and 188, which has to transmit the load of the floor to the beam joints.

The booms are composed of half **IPE**-type sections. These permit welding diagonals and struts onto the core of the sections without adding any type of ribbing or additional reinforcement. Tubular sections are not used as they have a higher unitary cost, and this is also why L-shaped sections are used in the diagonals.

The beams used weigh approx. 25 kg/m^2 I.e., the span of 15 m is covered at quite low cost. To visualise this, the design here may be compared with another one, figure 189: at half the span, with a modulation of 7.5 m × 7.5 m with beams and tie beams at 2.5 m (to maintain the type and span of the floor structure). If double **T**-beams are used continuously, and if an average flexor moment is considered (i.e., a $pL2/16$), then **IPE–400** is needed for the beams and **IPE–270** for the tie beams. The unitary consumption for this solution also amounts to about 25 kg/m^2. The slenderness of the primary beams is 18.75, that of the tie beams is 27.77; this permits continuity at the ends. It looks like a trick. This modulation, with half the span of the previous one, has the problem that it transmits the whole primary load 7.5 m in one direction and then 7.5 m in the other direction. Simple but not obvious at all.

The reader may say that the comparison is unfair, given that in these solutions not only the span is different. What price would have to be paid if the span were reduced from 15 m to half that, for example, 7.5 m, ceteris paribus? The size/weight ratio would be lineal: half the cost. But all professionals know that 25 kg/m^2 is a very small price to pay for having the whole interior span of 15 m open.

This structure supports the architecture in a secondary plane, corresponding to composed and functional design. This tremendously effective design goes unnoticed by non-specialists. And probably lots of specialists, too.

Si la luz a salvar va creciendo, el coste unitario de la estructura es mayor que la de una perfilería estándar. De ahí que, por ejemplo, si se salvasen 50 m de luz, merecería la pena separar más la estructura primaria y usar esa viguería secundaria que ahora se omite.

La esbeltez de 15 hace que el diseño lo condicione la resistencia y no la rigidez, cuestión clave. Si se aumenta la esbeltez el coste se va disparando de forma no lineal, algo a evitar si hay espacio para aumentar el canto, como es el caso.

La triangulación de las cerchas, con diagonales a 45° con los cordones, ofrece un consumo mínimo. Se añaden montantes para cortar la luz a flexión del cordón superior, figuras 186 y 188, que es quién debe trasladar la carga del forjado a los nodos de la cercha.

Los cordones se forman con medio perfil tipo **IPE**. Con ello se consigue poder soldar diagonales y montantes contra el alma de dichos perfiles sin añadir ningún tipo de cartela o refuerzo adicional. Se evita el uso de perfiles tubulares, más caros en coste unitario, y de ahí también el uso de perfiles en **L** en las diagonales.

La cerchas usadas pesan unos 25 kg/m^2. Es decir, la luz de 15 m se salva con un coste bastante bajo. Para visualizarlo se puede comparar este diseño con otro, figura 189: una luz mitad, con una modulación de 7,5 m × 7,5 m con vigas y viguetas a 2,5 m (de modo que se mantiene el tipo y luz del forjado). Si se usan vigas en doble **T** en continuidad, y considerando un momento flector medio (es decir, un $pL^2/16$), se necesitaría un **IPE-400** para las vigas y un **IPE-270** para las viguetas. El consumo unitario de esta solución es también de unos 25 kg/m^2. La esbeltez de las vigas primarias es de 18,75, la de las viguetas de 27,77; cosa que permite la continuidad en extremos. Parece haber truco. Esta modulación, con una luz mitad de la anterior, tiene el problema de que se lleva toda la carga primero 7,5 m en una dirección y luego, otros 7,5 m, en la otra. Sencillo pero nada obvio.

El lector podría decir que la comparación no es justa, ya que se comparan soluciones en las que no solo la luz es distinta. ¿Qué precio se pagaría por reducir la luz de 15 m a, por ejemplo, la mitad, 7,5 m, *ceteris paribus*? La relación entre tamaño y peso sería lineal: la mitad de coste. Pero cualquier profesional sabe que 25 kg/m^2 es un precio muy reducido a cambio de tener libre toda la crujía de 15 m.

La estructura apoya a la arquitectura desde un segundo plano, como corresponde a una arquitectura serena y funcional. Su diseño, tremendamente eficaz, pasa desapercibido al no especialista. Y, probablemente, a muchos especialistas.

Figura 190: El puente peatonal Allmandring.
Allmandring footbridge.

Figura 191: Vista inferior.
View under the bridge.

Figura 192: Anclaje al terreno de estribos para el pretensado del tirante.
Anchorage of the abutments to the ground to pre-tense the brace wire.

El puente peatonal Allmandring

Allmandring footbridge: Structural artifices.

Allmandring footbridge (1994), figure 190, is in Stuttgart University campus in Vaihingen district. It is by the engineer Gustl Lachenmann, while Wilhelm Zellner was the checking engineer and the architects Werner Kaag and Rudolf Schwarz also worked on it. I do not know who had the basic idea for this project. This is an arch that spans 34 m, with an edge almost 2 m wide and a total deck width of 3.15 m. It therefore has an overall slenderness of 17, which is unusual for an arch, as they usually have a slenderness value of from 4 to 8, or even 12, but not 17.

When looking at the structural patterns here struts can be seen between the arch and the brace wire, figure 191, but no diagonals can be seen that would triangulate the core and make it more like an arch with a variable edge, or more definitively a beam. The structural pattern here becomes clear when we look at its ends, figure 192: these are anchorage points which make it possible to pre-tense the brace wire. That is the secret here. This makes it possible to leave out the diagonals from the core, and due to this the upper boom dimensions can be seen to have very little inertia. It is prevented from sagging by its ties to the pretensed brace wire and the connecting struts. This is an ingenious idea, and we could say that it is a structural "artifice", in the best sense of the word. It is also very well resolved.

This achieves lightness, which is something that is highly appreciated in modern times and contemporary solutions. And it is done with a sophisticated and rigorous structure. Non-experts will not be able to read this technically. It is necessary to have a very clear idea of the concept of geometrical non-linearity. But non-experts will appreciate this lightness, which is the desired effect. I believe that this is a good project in itself, as well as its purpose if the setting and light are taken into account.

El puente peatonal Allmandring: artificios estructurales.

El puente peatonal Allmandring (1994), figura 190, está situado en el campus de la Universidad de Stuttgart en el distrito de Vaihingen. Es obra del ingeniero Gustl Lachenmann, actuando de "checking engineering" Wilhelm Zellner, y de los arquitectos Werner Kaag y Rudolf Schwarz. Desconozco de quién es la idea básica del proyecto. Se trata de un arco de 34 m de luz, casi 2 m de canto total y una anchura del tablero de 3,15 m. Tiene, por tanto, una esbeltez global de 17, cosa inusual en un arco, que suele moverse entre valores de 4 a 8, incluso de 12, pero no de 17.

En el esquema estructural se aprecian montantes entre arco y tirante, figura 191, pero no se ven diagonales que triangulen el alma y acerquen el tipo a la cercha de canto variable, a la viga, en definitiva.

El esquema estructural se manifiesta cuando miramos a los arranques, figura 192: hay unos anclajes a terreno que permiten un pretensado del tirante.

Ahí está el truco: por eso se evitan las diagonales del alma, y por eso se puede apreciar un dimensionado del cordón superior con muy poca inercia. Su pandeo se evita por su atado al tirante pretensado, con la conexión de los montantes.

Es una idea ingeniosa, podríamos decir que un "artificio" estructural, en el mejor sentido de la palabra. Está, además, muy bien resuelta.

Se consigue ligereza, algo muy valorado en la modernidad y en las soluciones contemporáneas. Y se hace con una sofisticada y rigurosa estructura. Su lectura técnica no está al alcance del profano.

Se tiene que tener muy claro el concepto de no-linealidad geométrica. Pero el profano sí aprecia la ligereza, que es finalmente el efecto buscado. Creo que es un buen proyecto si, además del propio objeto, se tiene en cuenta el contexto y la luz.

Figura 193: Fábrica Boots, vista general.
The Boots Building, general view.

Figura 194: Soportes con capitel y ábaco.
Supports with capital and abacus.

Figura 195: Patios interiores cubiertos.
Covered interior patios.

Edificio Boots

The Boots Building:
superb engineering in avant garde architecture.

The Boots Building (1930-33) in Beeston, Nottingham, figure 193, is by the engineer and architect E. Owen Williams. To be fair, we could say that he was an engineer first and foremost who sometimes did architecture. As an architect he has left two jewels, the Boots Building and the Express Building (1936–39) in Manchester.
The Boots Building is an industrial construction for pharmaceutical production. It is still in use after refurbishment in 1992-93.
The project could not be simpler: A grid with spans of 7 m × 9 m and 10 m × 11 m, depending on the zone, resolved, figure 194, with a solid slab only 25 cm to 38 cm thick thanks to the use of supports with a large abacus (and before that a capital). This type of building technique had been invented a short time beforehand by a North American, Turner, and a Swiss, Maillart, almost simultaneously. The facades are continuous glazed curtain walls divided into horizontal bands by the visible floor edges, with supports at the entrances.
The grid contains light wells, creating covered patios with magnificent 21 m trusses, figure 195, which support purlins and a roof of glass discs set in concrete (not I imagine without waterproofing problems).
It is a well-known fact that engineering played a major role in the birth of the Modern Movement; i.e., in the death of nineteenth century architecture. This magnificent work by Williams stands in the centre of this tradition. He uses cutting-edge engineering elements in avant garde architecture. He was a part of the current Zeitgeist, and many factors made this possible. Today engineering is far more advanced, but that spirit no longer exists, or no longer does so in such a pure and sincere way. These things change too with the Zeitgeist.

Edificio Boots:
ingeniería soberbia en la arquitectura de vanguardia.

El edificio de la empresa Boots (1930–33), situada en Beeston, Nottingham, figura 193, es obra del ingeniero y arquitecto E. Owen Williams. Podríamos decir, siendo justos, que es, ante todo, un ingeniero haciendo tanto ingeniería como, a veces, arquitectura. En su faceta arquitectónica ha dejado dos joyas, la Boots y el Express Building (1936–39) de Manchester.
La Boots es un edificio industrial de producción farmacéutica. Todavía está en uso después de una rehabilitación (1992–93).
El proyecto no puede ser más simple: Una trama con luces de 7,0 m × 9,0 m y 10,0 m × 11,0 m, según las zonas, resuelta, figura 194, con una placa maciza de espesores que van solo de 25 cm a 38 cm gracias al uso de soportes con un gran ábaco (y capitel previo). Se trataba de un tipo que había sido creado recientemente por el norteamericano Turner y el suizo Maillart, casi al mismo tiempo. Las fachadas se cierran con vidrio, dividido en bandas horizontales por el forjado que asoma, como los soportes en los accesos.
La trama se ahueca para dar iluminación, creando patios cubiertos con unas magníficas cerchas de 21 m, figura 195, sobre las que apoyan correas y un forjado de pavés que hace también de cerramiento (imagino que no sin problemas de impermeabilización).
Es bien sabido el gran papel que jugó la ingeniería en el nacimiento del Movimiento Moderno; es decir, en la muerte de la arquitectura decimonónica. Este magnífico trabajo de Williams está en el centro de esa tradición. Usando elementos de la vanguardia ingenieril se sitúa, al mismo tiempo, en la vanguardia arquitectónica. Era parte del Zeitgeist de la época, y son muchos los factores que lo hicieron posible. Hoy la ingeniería es más avanzada, pero ese espíritu ya no existe. No de esa forma tan pura y sincera. Cosas, también, del Zeitgeist.

Figura 196: La Filarmónica de Berlín, interior de la sala sinfónica.
The Berlin Philharmonic building, interior of the concert hall.

Filarmónica de Berlín

Berlin Philharmonic: organic rationalism.

The building which houses the Berlin Philharmonic Orchestra (1960-63) and which contains its concert hall, figure 196, is by the architect Hans Scharoun. The building was expanded to give it a chamber music room (1984-87) in a project by Scharoun and Wisniewski, in a basically hexagonal shape and in a sweeter organic style which eventually lacks a clear spirit. These works form a part of Kulturforum, an initiative in the 1960s that aimed to promote a new image of the city, partly by building new cultural facilities such as this. Or like the Neue Nationalgalerie by Mies (see page 191). It is hard to find two architectures that are more antithetic; something which is surely very healthy.
The work commenced with the design of the concert hall, Figure ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., which places the orchestra in a central area surrounded by a cascade of stalls. This is a magnificent space. Taking this shape into the exterior and recreating it in unconventional geometries is a more arbitrary decision; although I do not believe that anyone doubts that even the design of the concert hall is organic, due above all to the will of the architect. Not only the geometry is unconventional. The design of the roof goes with it, figure 197, and even the colour does, too.
The exterior shape was not liked in the city. But nobody denied the acoustic quality of the hall. And it is that this organic geometry from the floor to the ceiling creates a crucible of planes that favour its acoustic performance. The lighting is wonderful, too, full of small painstaking details such as the different lamps.

La Filarmónica de Berlín: racionalismo orgánico.

El edificio sede de la Filarmónica de Berlín (1960-63), que contiene su sala sinfónica, figura 196, es obra del arquitecto Hans Scharoun. El edificio se amplía para dotarlo de una sala de cámara (1984–87), con un proyecto de Scharoun y Wisniewski, de forma básicamente hexagonal y con un organicismo edulcorado que, al final, no tiene un sello claro.
La obra forma parte del Kulturforum, iniciativa de los años 60 que pretendió impulsar una nueva imagen de la ciudad, en parte gracias a la construcción de obras de equipamiento cultural como esta. O como la Neue Nationalgalerie de Mies (véase la página 191). Es difícil encontrar dos arquitecturas más antitéticas; algo que seguramente sea muy sano.
La obra nace desde el diseño de la sala sinfónica, situando a la orquesta en una zona central envuelta por una cascada de plateas. Es un espacio magnífico. El traslado de esa forma al exterior, recreándose en formas no convencionales, es una decisión más arbitraria; aunque no creo que nadie dude de que incluso el diseño de la sala sinfónica es organicista, ante todo, por propia voluntad.
No solo la geometría es poco convencional, el diseño de los cerramientos acompaña, figura 197, incluso, en la elección del color. La forma exterior no tuvo buena acogida en la ciudad, pero nadie discutió la calidad acústica de la sala. Y es que esa geometría organicista, de suelo a techo, crea un crisol de planos que la favorecen. El tratamiento de la iluminación es también espléndido, lleno de pequeños detalles muy cuidados, como las distintas lámparas.

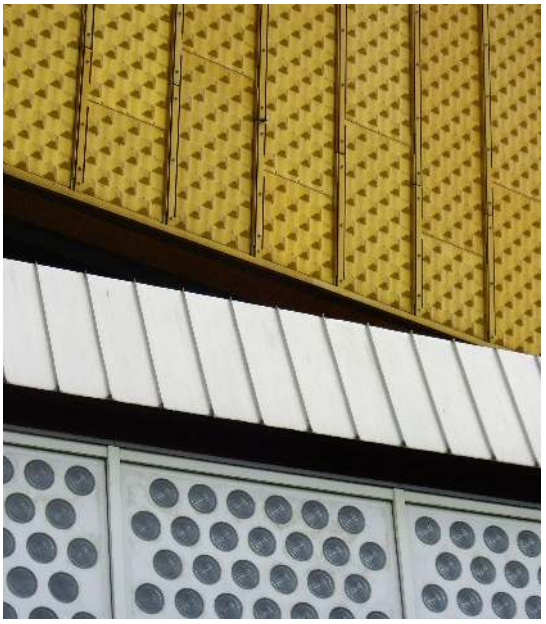


Figura 197: La Filarmónica de Berlín, cerramientos de fachada y lámparas de la sala sinfónica. *Detail of the cladding on the facade and lamps in the concert hall.*

Figura 198: Escaleras del vestíbulo de la sala sinfónica. *Stairs running from the entrance hall to the concert hall.*

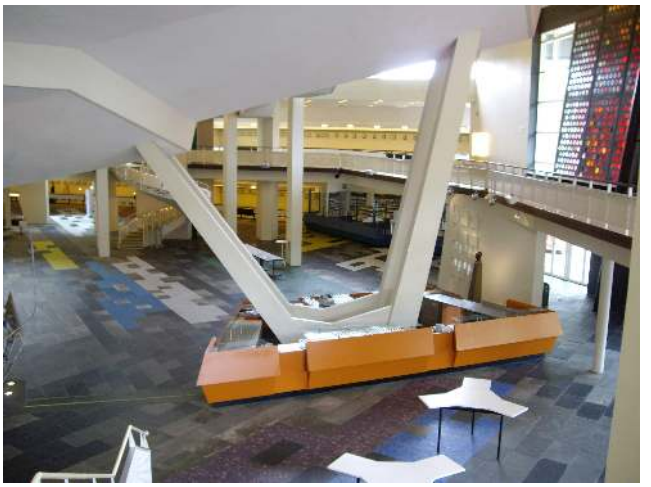


Figura 199: Vestíbulo de la sala sinfónica.
Concert hall vestibule.

The entrance hall is at a slightly lower level than the concert hall, figure 199, so that it is under the tilted floor of the concert hall, using it to create a similar geometry to that of the hall itself. The higher access points to the hall are integrated in a forest of walkways and stairways.
The central supports of the entrance hall are tilted and brace the hall. Although they undoubtedly have their own structural logic, they are clearly created not for structural reasons but rather to harmonise with the broken geometry of the whole work. The same can be said of the design of the entrance hall stairways. Even the choice of concrete is strongly influenced by the general lines of the work. This is logical here, as although the structure has to be properly resolved it also has to be governed by the architectural project. In the light of the problem this is permissible.
The project commences with the design of the concert hall, with a layout and shape that are good for its acoustics. Could a more rational starting point be imagined? Its free forms therefore have little to do with majority of current approaches. Scharoun translates this organic approach out onto the exterior and plays with it; but he knows how to measure the importance of each contract, and his proposals are proportional to this importance.
This is a very singular work, I believe that it is a pioneer. Its "odd" exterior, which is very deliberate, has probably not helped it to be appreciated as much as it should.
I believe it to be very illustrative to compare this work with Sydney Opera House (see page ¡Error! Marcador no definido.), as in this, its two main concert halls were the last things to be designed.

El vestíbulo está a una cota algo más baja que la sala sinfónica, figura 199, lo que permite que se meta bajo el forjado inclinado del patio de butacas y lo utilice para crear un espacio de una geometría similar a la de la propia sala. Los accesos a cotas más altas de la sala quedan integrados en un bosque de pasarelas y escaleras.
Los soportes centrales del vestíbulo, inclinados, que apuntalan la sala, tienen una lógica estructural indudable, pero obviamente no nacen desde la estructura sino para acompañar la geometría quebrada del conjunto. Lo mismo se puede decir del diseño de las escaleras del vestíbulo. Incluso la elección del hormigón está muy marcada por las trazas generales de la obra. Esto es lo lógico aquí, la estructura debe ser resulta con oficio pero debe condicionarse al compás marcado por el proyecto de arquitectura. Las luces del proyecto lo permiten.
El proyecto nace desde el diseño de la sala sinfónica, con una organización y forma que favorece la acústica ¿Cabría un punto de partida más racionalista? En ese sentido, sus formas libres tienen poco que ver con la mayoría de los planteamientos actuales. Scharoun traslada ese organicismo al exterior, se recrea en él; pero sabe medir el peso de cada encargo y sus propuestas son proporcionales a ese peso.
Es una obra muy singular, creo que pionera. Su "rareza" exterior, muy deliberada, probablemente no ha ayudado a valorarla en su justa medida.
Es muy ilustrativa la comparación de esta obra con la Ópera de Sydney (véase la página 139), en la que lo último que se diseñó fueron sus dos salas principales.

Figura 200: La Nueva Galería Nacional, vista general de la planta de acceso.
The New National Gallery, general view of the entry level.

Nueva Galería Nacional de Berlín

The New National Gallery, Berlin is less more?

The New National Gallery (1962-68) in Berlin is the last work by Ludwig Mies Van der Rohe; it largely expresses his project strategies and most particularly his way of handling structure figure 200.
The building is divided into two floors. One is semi-underground and opens onto a patio, which functions as a large base for another higher floor, with an entrance composed of a large glass pavilion, figure 200.
The entrance pavilion is the building's icon. It is built in the form of a steel grid measuring 64.8 m × 64.8 m that rests on eight articulated 8.40 m tall steel joints. The edges of the beams are 1.80 m wide, giving a slenderness of 36.
This value is at the limit of possibilities for compliance with the need for rigidity. However, it is also clear that the weight of the grid itself amounts to a high percentage of the total load, so that this structure is at the reasonable limit of resistance.
The supports are distant from the corners, which greatly improves the working of the slab. The glass facade has been retracted to form a 50.5 m square. All of the steel sections used are open, figures 202 and 203.
This is due more to aesthetic reasons than it is to structural ones, especially in the supports.[a] The same strategy is applied to the carpentry, which of course is in steel, too figure 204. These features recur in Mies's works.
The base has a modular structure that is 9 times smaller, i.e., it measures 7.2 m × 7.2 m, which is far more reasonable.
The entrance pavilion is a large atrium that is also used for temporary exhibitions. However, its function as an atrium in Mies's concept is the crucial one. The lower floor, the base, contains the permanent exhibitions and auxiliary spaces.

[a] Warping caused by torsion has to be studied in these open sections. This is unusual and does not indicate a very good structural design.

Die Neue Nationalgalerie: ¿menos es más?

La Nueva Galería Nacional (1962-68) de Berlín, es la última obra de Ludwig Mies Van der Rohe; obra que resume, en gran medida, sus estrategias de proyecto, y en particular su forma de manejar la estructura, figura 200.
El edificio se organiza en dos plantas: Una semienterrada, abierta a un patio, que sirve de gran zócalo a otra superior y de acceso, formada por un gran pabellón acristalado, figura 201.
El pabellón de acceso es la imagen del edificio. Se construye con un emparrillado de acero de 64,8 m × 64,8 m de lado apoyado, de forma articulada, sobre ocho soportes, también de acero, de 8,40 m de alto. El canto de las vigas es de 1,80 m, lo que supone una esbeltez de 36. Es un valor ya bastante límite de cara a cumplir con el requisito de rigidez. Pero además es obvio que el peso propio del emparrillado supone un porcentaje muy elevado de la carga total, por lo que la estructura está ya en el límite razonable de cara a la resistencia.
Los soportes se alejan de las esquinas, lo que favorece notablemente el funcionamiento de la placa. La fachada de vidrio se retranquea formando un cuadrado de 50,5 m de lado. Toda la perfilería de acero es de perfiles abiertos, figuras 202 y 203, algo que nace desde la estética y no tanto de la estructura, especialmente en los soportes[a]. Y esa misma estrategia se aplica con el despiece de la carpintería, por supuesto de acero, figura 204. Estas operaciones son recurrentes en la obra de Mies.
En el zócalo se usa una estructura modular 9 veces más pequeña, es decir, de 7,2 m × 7,2 m, algo ya mucho más razonable.
El pabellón de acceso es un gran atrio que se usaría además para exposiciones temporales. Pero su función de atrio, en el planteamiento de Mies, es el crucial. En la planta inferior, el zócalo, se instalan las exposiciones permanentes y otros espacios auxiliares.

[a] En esas secciones abiertas debe estudiarse el pandeo a torsión, cosa inusual y que no supone, precisamente, un buen diseño estructural.

Figura 201: Zócalo y patio lateral. *Base and side patio.*

If both floors hold exhibitions, you may ask why, if a span of 7.2 m is sufficient in the base, one of 64.8 m is necessary in the entrance pavilion. It is therefore clear, if it were not so from the first, that the latter span is not due to functional reasons but rather to image.

This was not the first time that Mies used this functional pattern, as he did so in the Crown Hall (1956) of the Illinois Institute of Technology (IIT) in Chicago, although there the semi-subterranean base is included within the facade. The Crown Hall holds the ITT Architecture School, which Mies directed from 1938 (first as the Armour Institute of Technology, the precursor of the ITT) until 1958[a]. It has a rectangular floor plan measuring 67 m × 36 m, with a height of 7 m over ground level. The open-plan entrance floor is also covered with a metal structure composed of four steel porticos as its first order elements. They have reinforced edge beams that project from the roof and cross the lesser span of 36 m.

Life in the Crown Hall takes place mainly in the lower ground floor, which does not have the best possible lighting. As in Berlin the ground floor is a large atrium with a role that is symbolic above all. This approach is more than questionable from a functional point of view.

The Parthenon in Athens has a floor plan measuring 69.5 m × 30.9 m, and its columns are 10.4 m tall. These buildings are of similar size, and both use lintel architecture, with a very simple order that is also very powerful. Mies seems to aspire to recreating classical order using steel and glass.

His "less is more" involves eliminating everything that does not create a strict order. This is his great virtue. Nevertheless, classical orders worked because buildings were always of a similar size. Mies seems to forget this question, so that as we will see he becomes deeply mistaken. On the other hand, and as Rudolf Arnheim pointed out, his "less is more" is only possible if the complexity which many building require is sacrificed, in functional as well as in technical terms.

[a] Mies emigrated to the U.S.A in 1938. He had directed the Bauhaus from 1930 to 1934, and was already a famous avant garde architect in the modern movement.

Si ambas plantas alojan exposiciones, uno puede preguntarse por qué en el zócalo es suficiente una luz de 7,2 m y en el pabellón de acceso hacen falta 64,8 m. Es obvio entonces, si no lo era desde el principio, que esta última luz no viene dictada por motivos funcionales, sino de imagen.

No será la primera vez que Mies use este esquema funcional, ya lo hizo en el Crown Hall (1956) del Illinois Institute of Technology (IIT) de Chicago, sólo que ahí el zócalo semienterrado queda integrado en la fachada. El Crown Hall es la Escuela de Arquitectura del IIT, que Mies dirigió desde 1938 (primero como Armour Institute of Technology, que dió luego lugar al ITT) hasta 1958[a]. Su planta es un rectángulo de 67 m × 36 m, con una altura de 7 m sobre rasante. La planta diáfana de acceso se cubre, también, con una estructura metálica, cuyo primer orden son cuatro pórticos de acero que tienen unas vigas armadas de canto que sobresalen de la cubierta y que salvan la luz menor, 36 m.

La vida del Crown Hall se desarrolla sobre todo en el semisótano, que no tiene la mejor iluminación posible. La planta baja hace, como en Berlín, de gran atrio, y su papel es, sobre todo, simbólico. Un planteamiento más que cuestionable desde un punto de vista funcional.

El Partenón de Atenas mide en planta 69,5 m × 30,9 m; y las columnas tienen 10,4 m metros de altura. Son edificios de un tamaño similar, ambos de una arquitectura adintelada y con un orden muy simple y, a la vez, muy potente. Mies parece que aspira a recrear el orden clásico con acero y cristal. Su "menos es más" es una eliminación de todo lo que no dé como resultado un orden estricto. Esa es su gran virtud. Pero los órdenes clásicos funcionaban porque los tamaños de los edificios eran siempre similares. Mies parece olvidar esa cuestión, y ahí se equivoca profundamente, como luego veremos. Por otra parte, y como ha señalado Rudolf Arnheim, su "menos es más" sólo es posible sacrificando la complejidad que muchos edificios necesitan, desde lo funcional pero también desde lo técnico.

[a] Mies emigra a EE.UU. en 1938, y había dirigido la Bauhaus de 1930 a 1934, además de ser ya entonces un afamado arquitecto de la vanguardia del movimiento moderno.

Figura 202: Detalle tipo del emparrillado. *Standard detail of grid.*

El Crown Hall, como otros edificios icónicos del movimiento moderno, no se entendería sin el contexto de búsqueda formal que caracteriza a esa vanguardia. Mies, como el resto de los arquitectos del movimiento moderno, se apoya en los nuevos materiales para crear nuevos lenguajes formales. En la mayoría de los casos la cosa se queda ahí, en nuevas formas. Pero esos cambios impregnan cada época, son una necesidad del ámbito cultural y una expresión, al mismo tiempo. No es algo menor. La estructura juega un papel visual importante, pero en general no hay un verdadero diálogo con la estructura desde lo mecánico sino, fundamentalmente, desde lo formal. Dependiendo del caso, esa estrategia puede o no funcionar.

En esa nueva búsqueda Mies usará, como rasgo más característico, el acero y el vidrio. Pero esos nuevos materiales serán el día a día de mucha de la nueva arquitectura. Mies añade dos cuestiones, como ya se comentó: un fuerte orden, potenciado por el uso de muy pocos elementos compositivos, que lo potencia; y, casi unido a ello, la predilección por la arquitectura adintelada de lo vertical y horizontal. Pero es como si no pudiera haber otra opción, ni siquiera en la elección del material. Volvamos a La Nueva Galería Nacional para seguir analizando sus estrategias de diseño.

El esquema funcional, y en parte formal, de La Nueva Galería Nacional tiene relación, como se ha dicho, con el Crown Hall. Pero en lo formal, el Crown Hall tiene, sobre todo, relación con la Casa Farnsworth (1945-50), mientras que La Nueva Galería Nacional viene de esquemas compositivos usados en dos propuestas no construidas pero claves en la obra de Mies: su Casa 50′ × 50′ y la Sala de Convenciones para el McCormick Place.

La Casa 50′ × 50′ (1951-52) es una vivienda de una sola planta cuadrada de 50 pies de lado, es decir, aproximadamente 15 m. Su estructura es un emparrillado de acero con perfiles en doble V sustentada por cuatro soportes situados en medio de la fachada. La fachada está completamente acristalada. Es decir, es un esquema compositivo casi idéntico al de La Nueva Galería Nacional: un potente arquitrabe sobre columnas que huyen de las esquinas, todo en acero y vidrio. La estructura adintelada parece griega. Las luces, de 15 m, son muy adecuadas para el emparrillado. Estructura y composición cuadran perfectamente. La casa es todo un manifiesto. Hoy día, su única pega sería la eficiencia térmica, pero quizás eso deje de ser un problema con nuevas tecnologías futuras del vidrio.

The Crown Hall, like other iconic modern movement buildings, cannot be understood without this context of investigating design which characterised the movement. Mies's works, like other modern movement architecture, use new materials to create new design languages. In most cases that is all that they are, new designs. But these changes dominate each time they occur, and are a cultural necessity as well as an expression. This is not a minor item. Although structure plays an important visual role, in general there is no true dialogue with structure based on mechanical considerations. The dialogue with structure takes place in fundamentally design terms. Depending on the case in question, this strategy may or may not work.

In this new search Mies used steel and glass as its most characteristic trait. However, these new materials were in everyday use in much of the new architecture. Mies adds two matters here, as was pointed out above: a strong order, emphasised by the use of very few compositional elements; and, almost united with this, a predilection for vertical and horizontal lintel architecture. But it is as if any other option were impossible, not even in the choice of material. We will return to the New National Gallery to continue examining the design strategies used.

The functional and in part the design project for the New National Gallery is connected, as was pointed out above, with the Crown Hall. Nevertheless, in terms of its design the Crown Hall has more to do with Farnsworth House (1945-50), while the New National Gallery stems from compositional schemes used in two unbuilt proposals by Mies that are of key importance in his work: his 50'×50' House and the Convention Hall for McCormick Place.

The 50'×50' House (1951-52) is a square 50-foot wide single-storey house, i.e., approx. 15 m. It has a steel grid structure with double V sections held by four supports located in the middle of the facade. The facade is completely glazed. So this design composition is almost identical to that of the New National Gallery: a strong architrave over columns that are distant from the corners, all in steel and glass. The lintel structure looks Greek. The 15 m spans are very suitable for the grid. The structure and composition fit perfectly. This house is a manifesto in itself. Nowadays its only problem would be its thermal efficiency, although this may cease to be a problem with new glass technologies in the future.

Figura 203: Detalles de cabeza y pie de los soportes. *Details of the top and bottom of supports.*

His second use of this same compositional scheme was his proposal for a Convention Hall in Chicago, McCormick Place, (1953-54). This plans an open space measuring 720×720 feet, i.e., a span of about 220 m. This was to be resolved using a large steel grid, in a lattice this time, with a slenderness of 24 and an edge approx. 9 m wide. This uses diagonals, which are also used on the facade. It seems that this was all he was prepared to surrender in terms of changing structural type. Although this slenderness could be suitable for smaller spans, it is not suitable for one of this length. It is really the type that is unsuitable, as it is outsize.

What happened could have been foreseen. McCormick Place was eventually built by disciples of Mies, with spans of 45 m and a latticework steel structure with an edge 4.7 m wide, i.e., a slenderness of approx. 10. A space of this type requires no greater span. Although sometimes spans of about 100 m are achieved, they are of more suitable types and have slenderness ratios much lower than 24.

So here Mies is planning to use the same compositional scheme, which is strongly based on the image of the structure, almost regardless of its size. But it does not seem reasonable for a 15 m wide house to have a similar structure to that of a convention hall measuring 220 m wide. It is simply impossible.

In the IIT, at the same time, Myron Goldsmith read a Master Thesis (Goldsmith, 1953) on the influence of size on the form of structure. The reader would be correct to assume that he was not directed by Mies. His thesis was directed by another well-known German architect and town planner who, like Mies, had to emigrate to America in 1938: Ludwig Hilberseimer. He was the town planning professor in the IIT. I do not believe that his direction of the thesis was very much more than nominal, as is shown by the careers of Goldsmith and Hilberseimer.

Similar things could be said about the blocks of flats by Mies. The most paradigmatic case is the Seagram Building in New York (1954–58), which has 38 storeys and is 157 m tall. The structure was designed by Severud Associates. The retraction of the building, creating a small plaza, is a masterful move. The facade is impeccable, a curtain wall with bronze sections (in open profiles, of course), and a classical arrangement of base, shaft and capital.

Su segundo acercamiento a ese mismo esquema compositivo es su propuesta para una Sala de Convenciones en Chicago, el McCormick Place (1953-54). Plantea un espacio diáfano de 720 × 720 pies, es decir, unos 220 m de luz. Lo quiere solucionar con un gran emparrillado de acero, esta vez en celosía, con una esbeltez de 24, unos 9 m de canto. Eso implica diagonales, que también lleva a fachada. Parece que eso es todo lo que Mies está dispuesto a ceder en cuanto a cambio de tipo estructural. La esbeltez podría valer para una luz bastante menor, pero no para esa luz. En realidad, es el tipo el que no es adecuado, está fuera de tamaño.

Y lo que sucedió era lo previsible. El McCormick Place se acabó construyendo, y por discípulos de Mies, con luces de 45 m y una estructura de acero en celosía de 4,7 m de canto, es decir, una esbeltez (estupenda) de aproximadamente 10. Este tipo de espacio no necesita más luz. A veces se llega al orden de los 100 m, pero con tipos más adecuados y esbelteces mucho más bajas de 24.

Es decir, Mies está planteado un mismo esquema compositivo, apoyado fuertemente en la imagen de la estructura, casi independiente del tamaño. Pero no parece razonable que una casa de 15 m de lado pueda tener una estructura similar a la de una sala de convenciones de 220 m de lado. Simplemente no es posible.

En el IIT, en ese mismo momento, Myron Goldsmith lee una Master Thesis (Goldsmith, 1953) sobre la influencia del tamaño en la forma de la estructura. El lector acertaría al suponer que no la dirigió Mies. Fue otro conocido arquitecto y urbanista alemán, también antiguo profesor de la Bauhaus, y que, como Mies, tuvo que emigrar a América en 1938: Ludwig Hilberseimer. En el IIT era profesor de urbanismo. No creo que su dirección fuese mucho más allá de lo nominal, como demuestran las trayectorias de Goldsmith y Hilberseimer.

Sobre el edificio de pisos de Mies se podrían decir cosas similares. El caso más paradigmático es el Seagram de Nueva York (1954-58), de 38 pisos en 157 m de altura. La estructura la desarrolla Severud Associates. El retranqueo del edificio, creando una pequeña plaza, es un gesto maestro. La fachada es impecable, un muro cortina con perfilería de bronce (en perfiles abiertos, por supuesto), y una organización clásica de base, fuste y capitel.

Figura 204: Detalle de la carpintería. *Detail of the metalwork.*

He could not leave the exterior structure in visible steel as he had initially wished, due to problems in case of fire. These supports were finally covered in concrete and remain hidden. He used the bronze metalwork to form the pattern he had wished to display using the structure but could not use. The structure is composed of the cores in concrete combined with triangulated steel panels. If the structure did not allow him to use the compositional design he always used, then he simply hid it. Although here at least there is an underlying logical structure, even though it is hidden. This is why the Seagram was built and not his proposal for McCormick Place. It is not necessary to display the structure to design good architecture.

I believe the Seagram to be a great building due to its urban setting, its impeccably ordered and elegant image, and its good floor arrangement. The fact that the effective structure is hidden is a project option that is as valid as any other, on condition that the result of the work is a good one, as it is here. But it is clear that there is a change of strategy in how the structure is handled. "ess is more" no longer applies to the structure here.

Avant-garde movements are usually tendentious; it is one of the results of moving into new territories. But the work of Mies went on to mark the next generation, which took the best from his architecture, its simple powerful order, but used it in a more flexible way. The magnificent works by the SOM architects Bruce Graham, Myron Goldsmith, Gordon Bunshaft and Fazlur R. Khan has a lot to do with Mies, but it is far more solid in functional and technical terms, and is much more "classical". And it has nothing against changing material. Thus the work of Gordon Bunshaft in prestressed reinforced concrete is still paradigmatic. Personally, what I like the most about Mies are two of his unbuilt proposals: his ideas for an office building in the Berlin Friedrichstrasse in the 1920s, expressed in magnificent charcoal drawings; and the 50'×50' House described above. His new reading of classical order using new materials was subsequently highly influential.

The New National Gallery sums up many of his proposals. Its grid would be more consistent with a shorter span, but this is explained by his work and his time. I believe that it would be irrational to repeat this approach today; it would be as if the modern movement had not happened. I believe that it would be better to concentrate more on the first SOM, as that is where the best of Mies can probably be found.

No pudo dejar la estructura exterior de acero vista por problemas de incendio, como inicialmente quería. Esos soportes finalmente se envuelven de hormigón y quedan ocultos, y hace con la carpintería de bronce lo que solía hacer con la estructura y ahora no puede. Estructura que usa los núcleos de hormigón combinado con paños de acero triangulados. Si la estructura no le deja usar su esquema compositivo de siempre la esconde. Aunque al menos aquí, aunque oculta, sí hay una estructura lógica detrás. Por eso se construyó el Seagram y no su propuesta para el McCormick Place. Y no hay por qué manifestar la estructura para hacer buena arquitectura.

Creo que el Seagram es un gran edificio por su inserción urbana, por su imagen impecablemente ordenada y elegante, y por su buena organización de la planta. El hecho de dejar oculta la estructura, eficaz, es una opción de proyecto tan válida como cualquier otra siempre que el resultado de la obra sea bueno, como aquí. Pero es obvio que hay un cambio de estrategia en el manejo de la estructura. El "menos es más" ya no alcanza ahora a la estructura.

Las vanguardias suelen ser tendenciosas; es una de las consecuencias de meterse en nuevos territorios. Pero el trabajo de Mies dejará huella en la siguiente generación, que tomará lo mejor de su arquitectura, ese orden elemental y potente, pero con mayor flexibilidad. La magnífica arquitectura desarrollada por el SOM de Bruce Graham, Myron Goldsmith, Gordon Bunshaft y Fazlur R. Khan tiene mucho de Mies, pero es mucho más sólida en lo funcional y en lo técnico, es mucho más "clásica". Y no tiene reparo en cambiar de material. Así, el trabajo de Gordon Bunshaft con hormigón armado y pretensado es todavía paradigmático.

Personalmente, lo que más me gusta de Mies son dos de sus propuestas no construidas: sus ideas para un edificio de oficinas de la Friedrichstrasse de Berlín de los años 20, con unos magníficos dibujos a carboncillo; y la mencionada Casa $50' \times 50'$. Su nueva lectura del orden clásico, con nuevos materiales, tendrá una gran influencia posterior.

La Nueva Galería Nacional sintetiza buena parte de sus propuestas. Su emparrillado sería más coherente con una luz menor, pero se explica dentro de su obra y su tiempo. Lo irracional sería, desde mi punto de vista, repetir hoy día el mismo enfoque; como si no hubiéramos pasado por el movimiento moderno. Creo que sería mejor mirar más a ese primer SOM, donde probablemente esté el mejor Mies.

Figura 205: Cubierta de la estación de ferrocarril de Leuven. *Leuven railway station roof.*

Figura 206: Interior de la estación. *View from the inside of the railway station.*

Cubierta de la estación de Leuven

**Leuven railway station roof:
Making structural use of bent sheet metal.**

Philippe Samyn and Partners designed the refurbishment of Leuven railway station (2007), Belgium, figures 205 and 206.
The new roof, which is composed of arched domes, has a primary structure of parabolic arches and successive spans of 52 m, 39 m, 39 mand 52 m, in four bands measuring 14.54 m, depending on the distance between the platforms. The arches emerge from supports that form a pyramid, so that the point where they start is completely constrained.
The arches are not in a vertical plane as they are slightly angled, forming zenithal bands of illumination. Each arch is composed of Vierendeel-type sections created by joining two half-curved **HEA** at the core by sheet metal, with total edge widths of from 30 cm to 50 cm. Each pair of arches which form the skylight is trussed every 3.25 m to prevent warping.
Bent curved sheet steel is placed over the main arches to form another arch, which is the one that creates the domed space. 30% of the bent sheet steel is perforated to improve its acoustic properties. The sheet metal is covered by a layer of insulation, which in turn is covered by aluminium, thereby preventing the danger of condensation forming on the sheet steel.
Although these are the main elements, there are other relevant details such as the vertical glazed facades or the peaks at the ends of the domes, which improve the response of the whole construction to the wind.
Philippe Samyn is an architect and engineer. Designs by his architecture company are firmly based on structure, and they are brilliant. This work is an example of this. The use of bent sheet steel as a structural element in flexion-compression, with spans somewhat greater than 10 m, is something that should be underlined. Although this work does not renounce a certain lyricism, it is lyrical in a very rigorous way.
I believe that this is an example of how using classical structural types, together with the new use of classical industrial products such as bent sheet steel, produces new and highly effective solutions. Solutions in line with the best 19th century pioneering engineering for roofing railway stations.

**Cubierta de la estación de ferrocarril de Leuven:
sacando partido estructural de la chapa plegada.**

Philippe Samyn and Partners diseña la rehabilitación de la estación de ferrocarril de Leuven (2007), Bélgica, figuras 205 y 206.
La nueva cubierta, una especie de bóvedas arqueadas, tiene una estructura primaria de arcos de trazado parabólico y luces de 52 m, 39 m, 39 m y 52 m sucesivamente, en cuatro bandas de 14, 54 m, según la separación de los andenes. Los arcos arrancan de unos soportes formando una pirámide, lo que hace del punto de arranque un lugar totalmente coaccionado.
Los arcos no siguen un plano vertical, sino ligeramente inclinado, con lo que se forman bandas de iluminación cenital. Cada arco se forma con perfiles tipo Vierendeel creados a partir de la unión de dos medios **HEA** curvados unidos en el alma por chapas, y con cantos totales de entre 30 cm y 50 cm. Cada pareja de arcos, que definen el lucernario, se ata cada 3, 25 m para evitar el pandeo lateral.
Sobre los arcos principales se coloca una chapa plegada de acero curvada de nuevo para crear el espacio abovedado. La chapa plegada está perforada un 30 por ciento para una mejora de las prestaciones acústicas. Sobre la chapa existe un aislante, y sobre este el cerramiento de aluminio, con lo que se evita el peligro de condensación en la chapa.
Esos son los elementos principales, aunque hay otros detalles relevantes como las fachadas acristaladas verticales o las viseras de los extremos de las bóvedas, que mejoran el comportamiento a viento del conjunto.
Philippe Samyn es arquitecto e ingeniero. Su estudio de arquitectura se apoya muchísimo en la estructura para diseñar, y lo hace de forma brillante. Esta obra es un ejemplo de ello. El uso de la chapa plegada de acero, como elemento estructural en flexo-compresión, con luces de algo más de 10 m, es algo destacable. La obra no renuncia a cierto lirismo, pero lo hace con muchísimo rigor.
Creo que es un ejemplo de cómo el manejo de tipos estructurales clásicos, unido al empleo novedoso de productos industriales ya clásicos, como la chapa pleagada de acero, produce soluciones nuevas y muy eficaces. Acordes con lo que ha sido la mejor ingeniería pionera del XIX para cubiertas de estaciones de ferrocarril.

Figura 207: Vista exterior de Palm House. *Exterior view of Palm House.*

Figura 208: Detalle de la estructura exterior. *Exterior structure detail.*

Palm House, Kew Gardens

Figura 209: Vista general de Palm House.
General view of Palm House.

Palm House, Kew Gardens, London: gardeners and industrial engineers creating cutting-edge architecture and engineering.

The Palm House (1844-48), figure 209, in Kew Gardens, London, is by the architect and garden designer Decimus Burton, together with Richard Turner, an ironmaster who also specialised in work of this type as a builder.
This was designed, as its name suggests, to house and exhibit many of the exotic palm trees that were brought back to the United Kingdom in Victorian times. The Palm House is probably the building still standing that best reflects, at least partially, Victorian architecture in iron and glass. This work is largely a continuation of the work of Joseph Paxton, the Head Gardener at Chatsworth from 1826 to 1856, Derbyshire, where he built the Great Stove (1836-40).
The Palm House owes its general shape to the Great Stove, together with the use of glass (it was the largest glass roof in the world). But Paxton used wood for structural ribbing, as he would in the Crystal Palace (1850-51), see page 205, while the Palm House is probably the first building to use hot rolled iron beams, which were already coming into use for shipbuilding. Its hull-like shape may stem from this, although it could also be due to the influence of the Great Stove.
It has a modest span of 15.2 m and a maximum height of approx. 20 m, and it contains 16,000 glass panels. The structure has three orders, figures 207 and 208: pioneering hot-rolled double **T** wrought iron beams which form transversal arches, horizontal purlins and curved sections in the vertical plane formed by the metalwork which holds the curved glass. This is a work of extraordinary delicacy.
These works, which were created without paying heed to the canons of nineteenth century architecture, and which are based on new materials and new industrial processes, created the bases for the modern movement. Gardeners and industrial engineers here are at the cutting edge of architecture and engineering.

Palm House, Kew Gardens, Londres: jardineros e industriales haciendo arquitectura e ingeniería de vanguardia.

El Palm House (1844-48), figura 209, en los Kew Gardens de Londres, es obra del arquitecto y diseñador de jardines Decimus Burton y de Richard Turner, frabicante de hierro y constructor especializado en este tipo de construcciones.
Se diseñó, y de ahí su nombre, para acoger y exhibir muchas de las "exóticas" palmeras llevadas al Reino Unido durante la época victoriana.
El Palm House es probablemente el edificio en pie que mejor pueda reflejar, al menos en parte, lo que fue la arquitectura Victoriana de vidrio y cristal. La obra es, en gran medida, heredera del trabajo de Joseph Paxton, "jardinero jefe" en Chatsworth, Derbys, entre 1826 y 1856, en donde construyó el Great Stove (1836-40).
Palm House le debe al Great Stove la forma general y el uso del vidrio (fue la cubierta acristalada más grande del mundo). Pero Paxton usó madera para los nervios estructurales, como luego repetiría en el Cristal Palace (véase página 205), mientras que la Palm House es probablemente el primer edificio que usa vigas laminadas en caliente, que ya se estaban utilizando en la construcción de buques. Su forma de casco de barco puede tener ese origen, aunque bien podría proceder del Great Stove.
Tiene una modesta luz de 15,2 m y una altura máxima de unos 20 m, y 16000 paneles de vidrio. La estructura está compuesta por tres órdenes, figuras 207 y 208: unas pioneras vigas de hierro forjado laminadas en caliente en doble **T** que forman arcos transversales, correas horizontales y perfiles curvos en el plano vertical formados por la carpintería en la que se asienta el vidrio curvo. Es una construcción de una delicadeza extraordinaria.
Estas obras, que nacen ajenas a los cánones de la arquitectura decimonónica, vinculadas a los nuevos materiales y nuevos procesos industriales, sentarán las bases del movimiento moderno. Jardineros e industriales en la vanguardia de la arquitectura y la ingeniería.

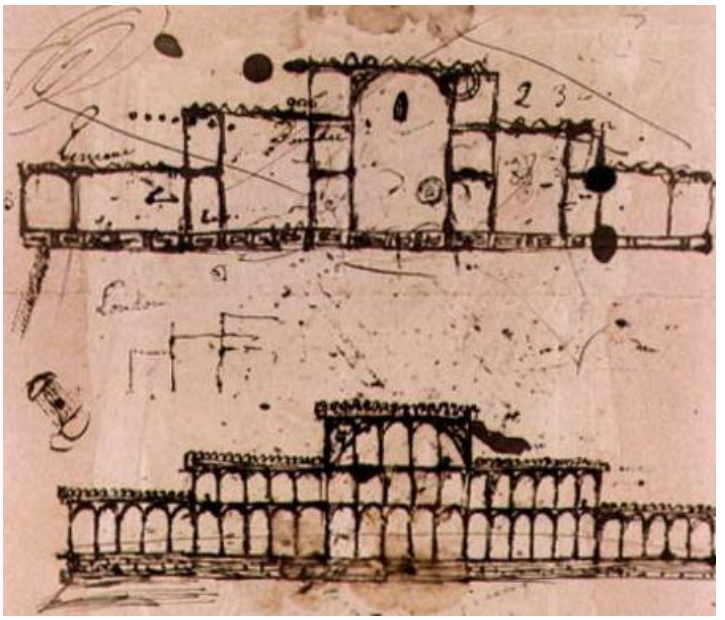


Figura 210: Boceto del proyecto del Crystal Palace.
Sketch of the Cristal Palace.

Figura 211: Vista exterior del Crystal Palace. *Exterior view of the Cristal Palace.*

Crystal Palace

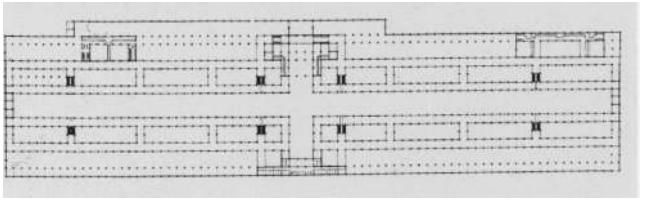


Figura 212: Planta general del proyecto.
Palace plan.

Crystal Palace:
gardeners and industrial engineers creating cutting-edge architecture and engineering.

The Crystal Palace (1850-51), figure 211, was built in Hyde Park, London, for The Great Exhibition of 1851. The design is by the "gardener" Joseph Paxton (see page 203). It was built by the company headed by the engineer Charles Fox; Fox, Henderson and Co, with accredited experience in large works. The engineering is by William Cubitt.

Its floor plan measures 563 m long by 139 m| wide. I.e., it occupied almost 8 hectares. In comparison, for example, The Escorial measures 207 m along its main facade and 161 m along the side.

Its arrangement has something of the floor plan of a basilica, figure 212. However, the large number of spaces, the size and the strict modular pattern make it less like a basilica and, in a way that is both more precise and closer, more like the proposals of Jean-Nicolas-Louis Durand in his Précis des leçons d'architecture, in 1802. This is therefore an avant garde floor plan, and it is not neoclassical.

This construction is prefabricated, with a basic module of 7.3 m×7.3 m. Its arrangement in longitudinal bands is divided into a central main section and a transept with a span of three modules, 21.9 m, with maximum heights of 19.8 m and 32.4 m, respectively. Other longitudinal bands consist of two modules and therefore measure 14.6 m. The rest of the building has the span of one module, 7.3 m.

The original drawing for the project was first made on a piece of paper that has been kept like a relic, figure 210. Nowadays this is a classic, although one always suspects that this "sketch" is always created at the end, not at the beginning.

Except for the roof, the whole structure is in cast iron, in parts that always weigh less than one tonne so that they can be easily hoisted using the available means. Continuity between the beams, which were prefabricated a little shorter than a module, is achieved by an ingenious system of cast iron channels that hold and support the beam. Bracing takes the form of Saint Andrew's crosses, in the roof, too.

Crystal Palace:
jardineros e industriales haciendo arquitectura e ingeniería de vanguardia.

El Crystal Palace (1850-51), figura 211, se construye en Hyde Park, Londres, para *The Great Exhibition* de 1851. El diseño es del "jardinero" Joseph Paxton (ver pagina 203). Lo construyó la compañía liderada por el ingeniero Charles Fox, de Fox, Henderson and Co, con acreditada experiencia en grandes obras. La ingeniería es de William Cubitt.

Su planta mide 563 m de largo y 139 m de ancho. Es decir, ocupa casi 8 hectáreas. Pensemos que, por ejemplo, El Escorial mide 207 m en la fachada principal y 161 m en la lateral. Su organización tiene algo de planta basilical, figura 212. Pero el gran número de crujías, el tamaño y el trazado modular estricto diluye esa referencia y nos acerca, de manera más precisa y cercana, a las propuestas de Jean-Nicolas-Louis Durand en sus *Précis des leçons d 'architecture* de 1802. Es, por tanto, una planta de vanguardia, y no neoclásica.

Se trata de una construcción prefabricada con un módulo base de 7,3 m × 7,3 m. Su organización en bandas longitudinales se jerarquiza a partir de una nave principal central y un transepto de una luz de tres módulos, 21,9 m, con alturas máximas de 19,8 m y 32,4 m, respectivamente. Hay otras bandas longitudinales de dos módulos, 14,6 m. El resto tiene de luz el módulo, 7,3 m.

Las trazas que definen el proyecto quedaron primero impresas en una servilleta de papel que se conserva como una reliquia, figura 210. Hoy día esto ya es un clásico, aunque uno siempre sospecha que ese "mono" se dibuja siempre al final, no al principio.

Salvo en cubierta, toda la estructura es de hierro fundido, con piezas que pesan siempre menos de 1 tonelada para poder ser izadas, con los medios disponibles, de forma ágil. La continuidad entre vigas, que se prefabrican con algo menos de un módulo de longitud, se consigue con un ingenioso sistema de cuñas de hierro forjado que traban viga y soporte. El arriostramiento se logra con cruces de San Andrés, también en cubierta.

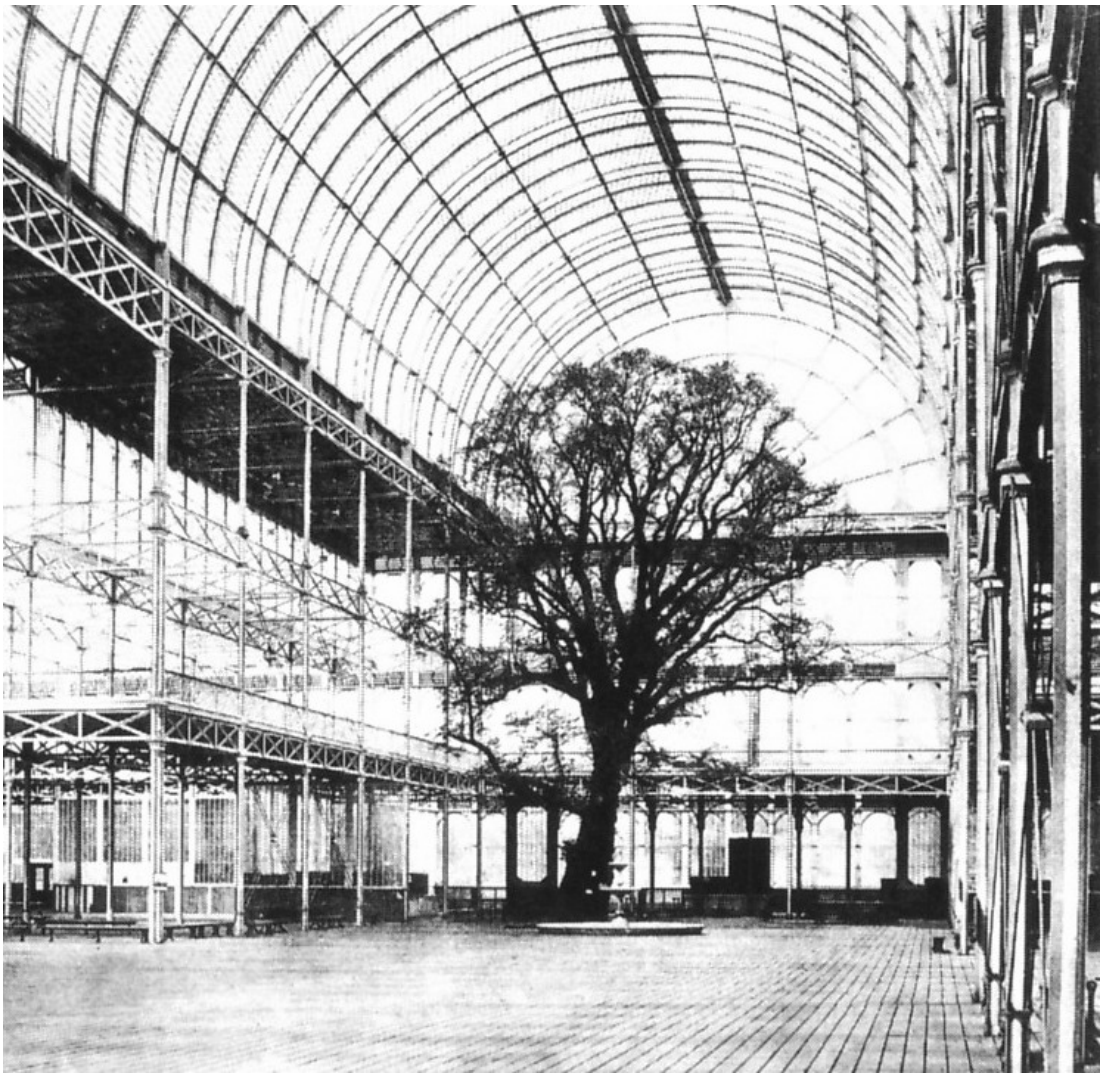


Figura 213: Interior del Crystal Palace. *Interior view of the Palace.*

More supports that function as uprights to hold smaller glass parts are on the facades. On the roof he repeats the idea that he had used in the Great Stove[a], with three bands of glass in **V** per module. In the flat parts the V-sections rest on iron beams, but in the large domed sections, figura 213, the ribs are wooden arches (sawn, of course), as he had used before in the Great Stove. Arches of this type, with a long tradition in Western building, were very often used in 19th century wooden buildings, when there was no other means of constructing them. This meant that the glass sheets could be of a reasonable size for production and strength: 1.25 m long and 0.254 m wide. This was rolled flat glass, a technique that had been developed in 1848 which greatly reduced costs.

The building was constructed in only nine months. The success of this work led to Joseph Paxton, Charles Fox and William Cubitt all being knighted, as was just. The image of this work was the commencement of modern architecture.

However, they had not been given the job directly, but rather after many other proposals had been made which were unviable due to their duration or cost. The offer of Fox, Henderson and Co. with Paxton's project was presented after the others, and it could not be improved in either respect. And it was credible, too.

Prefabrication was not only used to speed up construction; it was also due to the temporary nature of the pavilion. When the Exhibition ended it was disassembled after six months and re-erected at Sydenham Hill, although with major changes to its style, which was now more neo-classical. It finally burnt down in 1936.

Although structure here plays a key role, I would not say that it is the protagonist per se. New aesthetic values were being discovered in transparency and lightness, values which we now consider to be very much our own. And in the contemporary context this was surprising. Iron and glass make them possible, glass above all, as its prefabrication and dry assembly are of more importance than the particular way the structure was resolved.

I. K. Brunel, who was a member of the commission that directed the competition, thought that the building itself would be one of the best pieces in the exhibition. And he was right. This work had an enormous influence in the United Kingdom and abroad. When Paxton died in 1865, the obituary in The Times described him as the founder of a new style of architecture, and there is a lot of truth in that. As occurred years beforehand with the Palm House, but here far more powerfully, gardeners, industrial engineers and builders were creating avant garde architecture and engineering. We take note.

[a] I believe that this work has not been granted the importance it deserves; it is, to a great degree, the germ of the Crystal Palace.

En fachadas aparecen más soportes haciendo de montantes para sujetar piezas más pequeñas de vidrio. En cubierta Paxton repite la idea que ya usó en el Great Stove[a], con tres bandas de vidrio en **V** por módulo. En las partes planas las **V** se apoyan en vigas de hierro. Pero en las grandes naves, abovedadas, figura 213, los nervios son arcos encamonados de madera (aserrada, claro), como ya hizo en el Great Stove. Este tipo de arcos, de larga tradición en la construcción en occidente, fueron muy frecuentes en la construcción en madera del XIX. Entonces no había otra manera de realizarlos. Esto permite que los vidrios midan ya algo razonable, de cara a la producción y a la resistencia: 1, 25 m de largo y 0,254 m de ancho. Se trataba de vidrio plano producido por laminado, una técnica desarrollada en 1848 que abarataba mucho los costes.

El edificio se construye en solo nueve meses. El éxito de la obra hace que Joseph Paxton, Charles Fox y William Cubitt sean distinguidos como *Sir*. No era para menos. Se acuñó moneda con la imagen de la obra.

Pero el encargo de la obra no les llega de forma directa, sino después de múltiples propuestas inviables por plazo y/o costo. La oferta de Fox, Henderson and Co., con el proyecto de Paxton, presentada con posterioridad a las otras propuestas, era inmejorable en ambos aspectos. Pero, además, era creible.

La prefabricación no solo estaba ligada al plazo de construcción; también a la condición de pabellón temporal. A los 6 meses de finalizar la exposición se desmontó (no sin gran debate) y se volvió a construir en Sydenham Hill, aunque con grandes cambios en el estilo, más neoclásico. Finalmente, se incendió en 1936.

La estructura tiene un papel clave, pero yo no diría que es la protagonista *per se*. Se están descubriendo nuevos valores estéticos en la *transparencia* y la *ligereza*, valores que hoy consideramos propios. Y puesto en el contexto temporal es algo sorprendente. El hierro y el vidrio lo posibilitan. Sobre todo el vidrio. La *prefabricación* y el *montaje en seco* tienen más importancia que la forma particular de resolver la estructura.

I. K. Brunel, que formó parte de la comisión que valoró el concurso, pensaba que el propio edificio sería una de las mejores piezas de la exposición. Y así fue. La influencia de esta obra fue enorme, dentro y fuera del Reino Unido. A la muerte de Paxton, en 1865, el obituario del *The Times* lo describe como el fundador de un nuevo estilo de arquitectura. Y hay buena parte de verdad en ello.

Como ya sucedió años antes en la Palm House, pero de forma mucho más poderosa, jardineros, industriales y constructores están haciendo arquitectura e ingeniería de vanguardia. Tomemos nota.

[a] Creo que a esta obra no se le ha dado la importancia que merece; ahí está, en gran medida, el germen del Crystal Palace.

Figura 214: Picadero del Club de Campo, vista interior y de la fachada norte.
Casa del Campo Riding School, interior view and north facade.

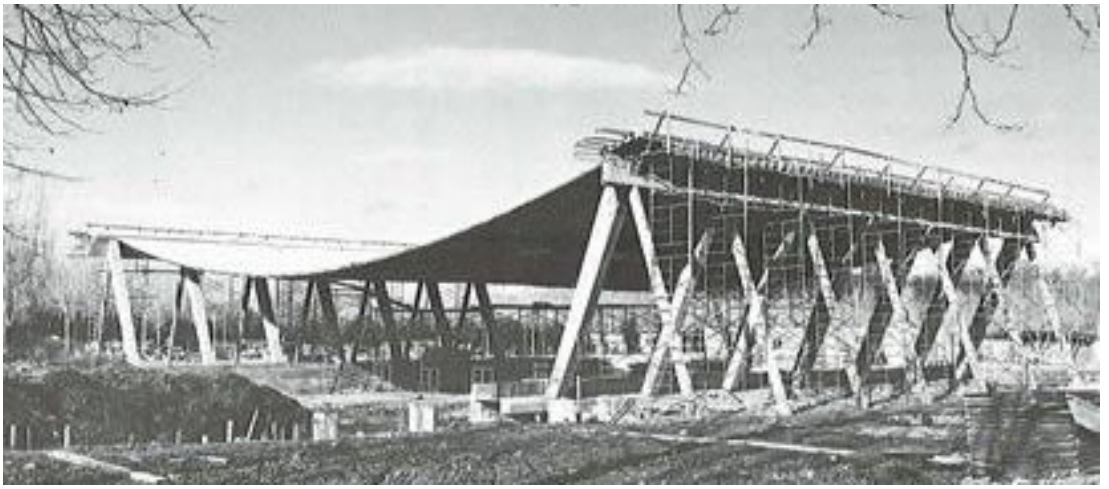


Figura 215: Imagen del montaje de la estructura. *Erecting the structure.*

Picadero del Club de Campo

Club de Campo:
A hanging roof.

The riding school of the Club de Campo Villa de Madrid (1961-68), figures 214 and 215, is by the architect José Antonio Domínguez Salazar and the engineer Carlos Fernández Casado, aided by the engineers Leonardo Fernández Troyano and Javier Manterola Armisén. In 1953 the architect, together with his colleagues Ricardo Magdalena Gayón and Carlos de Miguel González, had constructed, again with Fernández Casado, the new roof of San Mamés Stadium, with elliptic metal arches spanning 115.5 m. This was a major work in the Spanish panorama at the time.

The German company Dywidag (an acronym composed of the names of its founders, Dyckerhoff and Widmann) helped with the detailed design of the structure, and it manufactured the Gewi steel bars used.

Dywidag has built and sometimes also designed many of the most emblematic works in reinforced and prestressed concrete in the 20th century in Europe, as well more recently around the world. This company has been associated from the first with engineers as important as Franz Dischinger, Ulrich Finsterwalder or Anton Tedesko, who pioneered construction using concrete sheeting and other structural types. I.e., this company has executed and executes state-of-the-art projects requiring a high level of expertise.

Gewi bars are threaded, so that they can be joined using a threaded sleeve, which is necessary in this case. They can also be pre-tensed, which again was done here, so that they are a key aspect of the structure of this work.

The hanging roof spans 40 m, with an arch height of 2.6 m in the centre and 3 m at the sides, forming a gentle anticlastic curve that makes it possible to drain rainwater. The general slenderness ratio varies from 15.38 to 13.3, although these values are somewhat strong they are compatible with the span, which is short for a tensed roof. The building is 70 m deep.

Club de Campo:
Una cubierta colgante

El picadero del Club de Campo Villa de Madrid (1961-68), figuras 214 y 215, es obra del arquitecto José Antonio Domínguez Salazar y del ingeniero Carlos Fernández Casado, con la colaboración de los ingenieros Leonardo Fernández Troyano y Javier Manterola Armisén. El arquitecto, junto con sus colegas Ricardo Magdalena Gayón y Carlos de Miguel González, había construido en 1953, también con Fernández Casado, la nueva cubierta para el Estadio San Mamés, con unos arcos metálicos de 115,5 m de luz. Fue una obra muy importante en el panorama español de la época.

En el diseño de los detalles de la estructura colabora la empresa alemana Dywidag (acrónimo formado con el nombre de sus fundadores, Dyckerhoff and Widmann), que fabrica las barras de acero, tipo Gewi, que se utilizaron.

Dywidag ha construido, y a veces también proyectado, muchas de las obras más emblemáticas de hormigón armado y pretensado del siglo XX en Europa, y desde hace ya tiempo por todo el mundo. A esta empresa han estado vinculados en su comienzo ingenieros tan importantes como Franz Dischinger, Ulrich Finsterwalder o Anton Tedesko, pioneros en la construcción de láminas de hormigón y otros tipos estructurales. Es decir, es una empresa que hizo y hace proyectos punteros, con un importante *know how*.

Las barras Gewi tienen la corruga formando paso de rosca, lo que permite su empalme por manguito roscado, necesario en este caso. Además se pueden pretensar, cosa que aquí también se hace, de modo que su uso es un aspecto clave de la estructura de esta obra.

La cubierta colgante tiene una luz de 40 m, con una flecha de 2,6 m en el centro y de 3 m en los laterales, formando una ligera curvatura anticlástica que permite la evacuación de aguas. La esbeltez general va entonces de 15,38 a 13,3, valores algo fuertes pero compatibles con la luz, pequeña para una cubierta tensada. El fondo de la nave es de 70 m.

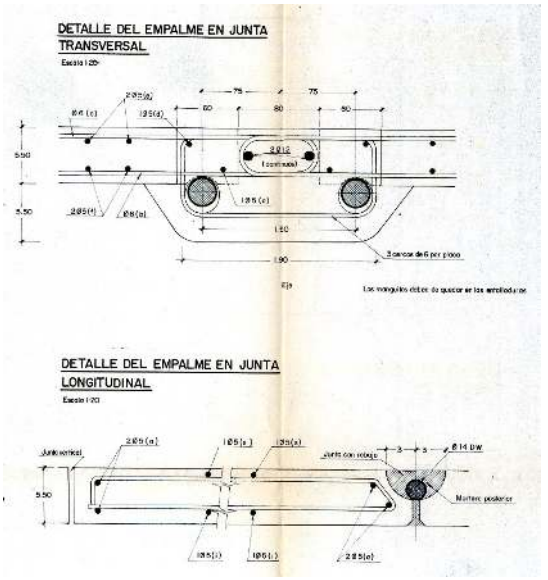


Figura 216: Detalle del nervio principal tipo de la cubierta. *Detail of the standard main roof rib.*

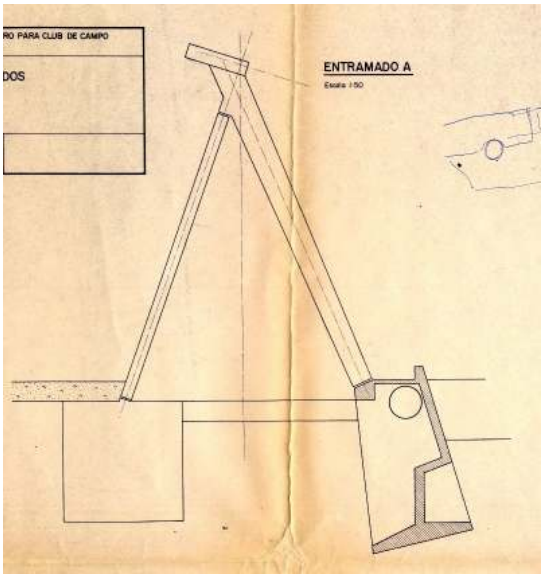


Figura 217: Esquema general de anclaje de la cubierta. *General pattern of the roof anchorage.*

Figura 218: Vista de la fachada oeste.
View of west facade.

Each load-bearing rib in the hanging structure, figure 216, is composed of two 26 mm diameter Gewi-type round bars in sleeves and separated by 15 cm from core to core. This pattern is repeated every 257 cm so that each bar supports prefabricated slabs spanning 249 cm, 118 cm wide and 5.5 cm thick, figure 219. A space of 8 cm is left between the slabs for pouring concrete on site to form a rib on the inside. In the transversal direction the slabs leave a semicircular gap on the upper surface which holds a 14.5 mm diameter Gewi bar that is slightly pre-tensed at the end of erection.
This solution makes it possible to erect the slabs without using scaffolding, and this is fundamental for the rationalisation of the work.
Each slab, figure 219, in the short direction has a 50 cm long and 6 cm deep groove to improve the behaviour of joint in the plan of the slab against wind shear.
An edge beam 1.5 m wide and 0.3 m thick, holds the anchorage of the 26 mm diameter bars. Two concrete bars in an inverted **V** form the roof support and anchorage, figure 217. These are located every two modules, i.e., every 5.14 m, which explains the large width of the edge beam. The situation of the edge beam is eccentric in relation to the intersection of the supports, so that as well as symmetrically pre-tensing the support under traction (to prevent fissures developing in bars exposed to the elements), while the other bar under compression is pre-tensed eccentrically, too. The transversal bracing is achieved using another edge beam at the head of the supports, figure 220.

Cada nervio de carga de la estructura colgante, figura 216, se forma con dos redondos de 26 mm de diámetro tipo Gewi de Dywidag enfundados en manguitos y separados 15 cm a ejes. Este esquema se repite cada 257 cm, lo que permite ir apoyando, sobre cada redondo, placas prefabricadas de 249 cm de luz, 118 cm de ancho y 5,5 cm de grueso, figura 219. Entre placas se deja un espacio de 8 cm para el vertido de hormigón in situ formándose un resalto al interior. En dirección transversal las placas dejan un hueco semicircular, por la cara superior, donde se aloja una barra Gewi de 14,5 mm y que se pretensa ligeramente acabado el montaje.
Esta solución permite un montaje de las placas sin andamios, algo fundamental para la racionalización de la obra.
Cada placa, figura 219, en la dirección corta, tiene un entalle de 50 cm de largo y 6 cm de profundidad que mejora el comportamiento a cortante de la junta en el plano de la placa.
Una viga de borde de 1,5 m de canto y 0,3 m de grosor, recoge el anclaje de los redondos de 26 mm. Dos barras de hormigón en **V** invertida forman el apoyo y anclaje de la cubierta, figura 217. Se sitúan cada dos módulos, es decir, cada 5,14 m, de ahí el importante canto de la viga de borde. La situación de la viga de borde es excéntrica respecto a la intersección de los soportes, por lo que, además de pretensar simétricamente el soporte traccionado (para evitar la fisuración en una barra a intemperie), también se pretensa excéntricamente la otra barra comprimida. El arriostramiento transversal se consigue con otra viga de canto en cabeza de los soportes, figura 220.

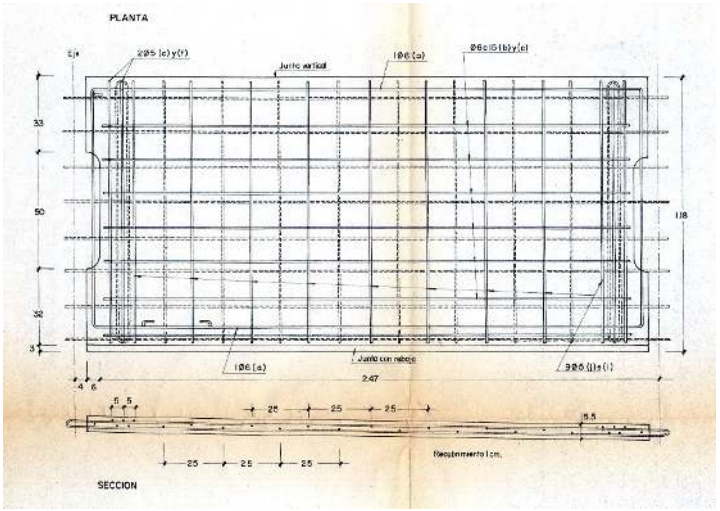


Figura 219: Placa prefabricada tipo de cubierta.
Standard prefabricated roof slab.

Figura 220: Módulo tipo y detalle de arriostramiento lateral. *Standard module and detail of lateral bracing.*

Figura 221: Detalle de cabeza de montantes de fachadas este y oeste.
Detail of east and west facade upright head.

Nótese el diseño de la cimentación, figura 217, con la zapata interior girada y la viga de atado que permite conseguir una reacción vertical en el contrarresto. Y, con ello, un anclaje sin pilotaje.
En los dos muros piñones verticales, por donde se produce la evacuación de las aguas, figura 218, aparece el problema de la interferencia entre el funcionamiento de la cubierta colgante y la fachada. Al igual que hizo Nervi en el *Palazzo del Lavoro* (ver página 133), los montantes de fachada, figura 221, solo transmiten en cabeza una fuerza horizontal, y de este modo no hay interferencia con el habitual funcionamiento de la cubierta colgante. Un detalle usual de buena práctica constructiva.
Es una magnífica estructura. Pero lo es en unión a un proyecto muy sólido y moderno. Las dos cosas están muy unidas. El semi-enterramiento de la nave, que no es problema alguno, facilita el uso al espectador y además ofrece un volumen mucho más limpio. Las fachadas sacan partido de una estructura tan poco usual en la España de los 60 (y todavía hoy día). Los materiales usados hablan también de modernidad. El empleo de una estructura tensada cuadra con la práctica de la hípica, es una forma grácil de "saltar" los 40 m de luz.
El manejo de la estructura es austero, siguiendo la racionalidad del uso de las placas prefabricadas de cubierta. Solo hay que comparar lo aquí realizado con otras soluciones construidas, más *high tech*, que recurren a este mismo tipo. La lógica de la estructura produce por sí sola una forma muy novedosa. Es indudable que la estructura es protagonista y generadora, de la mano de un ingeniero de lujo: Carlos Fernández Casado.
Pero también hay detrás un buen proyecto de arquitectura, con un manejo ejemplar de la sección, que ha sabido sacarle partido a una estructura y a una construcción simples y racionales.

Note the design of the foundation, figure 217, with the interior base turned and the tie-beam which makes it possible to have a vertical reaction in the counterweight. And that in an anchorage without piling.
In the vertical gables of both walls which drain rainwater, figure 218, a problem arises of interference between the working of the hanging roof and the facade. As Nervi did in the Palazzo del Lavoro (see page 133.), the heads of the facade uprights, figure 221, only transmit a horizontal force, so that there is no interference with the usual working of the hanging roof. This detail is usual in good practice.
This structure is magnificent. But it is so in combination with a very solid and modern project. Both things go very much together. The use of a semi-subterranean building, which is not a problem at all, aids spectator usage and moreover gives rise to a volume that is far cleaner. The facades use a structure that was very rare in the Spain of the 1960s (and which is still rare today). The materials used are modern, too. Using a tensed structure fits with the practice of horse-riding, as it is a graceful way of "jumping" the 40 m span. Structure here is handled in an austere way, following the rationality of the use of prefabricated roof slabs. You only have to compare what has been done here against other more high-tech constructed solutions that use the same type. The logic of the structure alone produces a very new shape. There can be no doubt that structure here is the protagonist and source, thanks to a very good engineer: Carlos Fernández Casado.
But there is also a good underlying architectural project which handles the section in an exemplary way, and which was able to make good use of a structure and construction that are simple and rational.

Figura 222: Puente sobre la Autovía A-6 en Torrelodones. *Bridge over the A-6 motorway in Torrelodones.*

Figura 223: Detalle del apoyo. *Detail of the support.*

Paso en la A–6 en Torrelodones

Flyover above the La Coruña motorway in Torrelodones: type and place.

The flyover above the road to La Corunna in Torrelodones (1966), figures 222 and 223, is by the Engineers Carlos Fernández Casado, Leonardo Fernández Troyano and Javier Manterola Armisén.
It has a total length of 53 m, with a span between supports of 48 m. The deck has an edge 0.8 m wide in the central span, 1.6 m wide above the central supports and 0.6 m wide at the ends.
This portico solution was suggested for the first time by the Italian engineer Riccardo Morandi. There is a traditional arch mechanism with a very high lintel slenderness ratio in the main span, meaning that flexion forces predominate. The corbelling makes it possible to reduce the width of the lintel in the main span; however, its dimensions, 48 m, and the material, concrete, make prestressing indispensible.
Both end braces are also prestressed, preventing the concrete from cracking in service and also improving the embedding of the central lintel. They are also angled, forming a braced plane.
This structure is an example of how new techniques give rise to the refinement and evolution of structural types. And it also shows how definitively type is a basic tool in structural design. Additionally, this is a solution which on paper would be very applicable to building structures.
On the other hand, this work responds to the "strict height bridge"[a] philosophy of Fernández Casado. As his son and engineer who helped in this work said, "with strict height and also forms and geometry without ornamental elements, he wanted to reduce the bridge to its essence". He also renounces the use of spans any longer than are necessary, an attitude that should be permanently modern; although unfortunately this is not the case. There is no better way of optimising structure than restricting yourself to the span that is indispensible.
At the end of the day there is a philosophy which underlies the choice of type. There are many ways of resolving this span, which is quite moderate for a flyover. There is an arbitrary element in civil engineering, and this increases in strength the smaller the span in question.

[a] This refers to the Colección de Puentes de Altura Estricta, see for example: http://ropdigital.ciccp.es/detalle_articulo.php?registro=15728&anio=1934&numero_revista=2637.

Paso sobre la carretera de La Coruña en Torrelodones: tipo y lugar.

El paso sobre la carretera de La Coruña en Torrelodones (1966), figuras 222 y 223, es obra de los ingenieros Carlos Fernández Casado, Leonardo Fernández Troyano y Javier Manterola Armisén.
Tiene una longitud total de 53 m, con un vano entre soportes de 48 m. El tablero es de 0,8 m de canto en el vano central, de 1,6 m sobre los soportes centrales y de 0,6 m en los extremos.
Se trata de una solución porticada planteada por primera vez por el ingeniero italiano Riccardo Morandi. Hay un mecanismo de arco tradicional, la gran esbeltez del dintel, en el vano principal, hace que las flexiones sean predominantes. El acartelamiento permite reducir el canto del dintel en el vano principal, pero sus dimensiones, 48 m, y el material, hormigón, hacen imprescindible el pretensado.
Los dos tirantes de extremo también se pretensan, lo que evita la fisuración del hormigón en servicio y mejora el empotramiento del dintel central. Además se inclinan formando un plano arriostrado.
La estructura es un ejemplo de cómo nuevas técnicas producen la depuración y evolución de los tipos estructurales. Y cómo, en definitiva, el tipo es una herramienta básica del diseño de estructuras. Se trata de una solución que, en esquema, es muy aplicable a estructuras de edificación.
Por otra parte, el puente entra dentro de la filosofía de Fernández Casado de "puentes de altura estricta"[a]. Como señala Leonardo, su hijo e ingeniero colaborador de la obra, "con la altura estricta, también de sus formas y geometría, sin elementos ornamentales, quería reducir el puente a su esencia". Hay, además, una renuncia a luces mayores de las imprescindibles, una actitud que debería ser perpetuamente moderna; aunque no es el caso, por desgracia. No hay mejor optimación de la estructura que limitarse a la luz imprescindible.
Ante una luz moderada como la del paso existen varias soluciones, pero, al final, la elección del tipo es una cuetión casi filosófica. También hay una componente de arbitrariedad en la ingeniería civil, mayor cuanto más pequeña es la luz.

[a] Me refiero a la *Colección de Puentes de Altura Estricta, véase por ejemplo http://ropdigital.ciccp.es/detalle_articulo.php?registro=15728&anio=1934&numero_revista=2637*

Figura 224: Puente sobre la A–6 cerca de Galapagar. *Bridge over the A–6 near Galapagar.*

Figura 225: Detalle de los soportes. *Detail of the support.*

Paso en la A–6 en La Navata

Flyover above the La Coruña motorway in La Navata: type and place.

Both flyovers above the La Corunna road in la Navata (1966), figures 224 and 225, are by the engineers Carlos Fernández Casado and Francisco Abollado. They span 25 m and 28 m, respectively.
Their structure consists of a portico with angled supports, so that the arch effect is important. Rocky outcrops have been used to place these bridges as low as possible, in a tremendously simple and elegant way.
I love this work. It is rational, simple, humble and yet also intense. And it is a part of the place, enhancing the landscape where it is inserted. This is small-scale engineering that I believe is very close to architecture. Or to sculpture, I'm not sure which.
The structures built by Carlos Fernández Casado always have the same rationalist and intense hallmark.
Works always express their designer's philosophy, regardless of whether they are architecture or engineering.

Paso sobre la carretera de La Coruña en La Navata: tipo y lugar.

Los dos pasos sobre la carretera de La Coruña en la Navata (1966), figuras 224 y 225, son obra de los ingenieros Carlos Fernández Casado y Francisco Abollado, con luces de 25 m y 28 m.
La estrutura es de pórtico con soportes inclinados, de modo que el efecto de arco es importante. Aprovechan unos peñascos para emplazarse con el mínimo gálibo y de una forma tremendamente sencilla y elegante.
Me encanta esta obra. Racional, sencilla, humilde y al mismo tiempo intensa. Y pegada al lugar, realza el paisaje en el que se inserta. Es ingeniería de pequeña escala que yo creo que está muy cercana a la arquitectura. O a la escultura. No lo sé.
Las estructuras de edificación de Carlos Fernández Casado tienen siempre ese mismo sello racionalista e intenso. La obra siempre pone de manifiesto la filosofía del diseñador. Sea en arquitectura o en ingeniería.

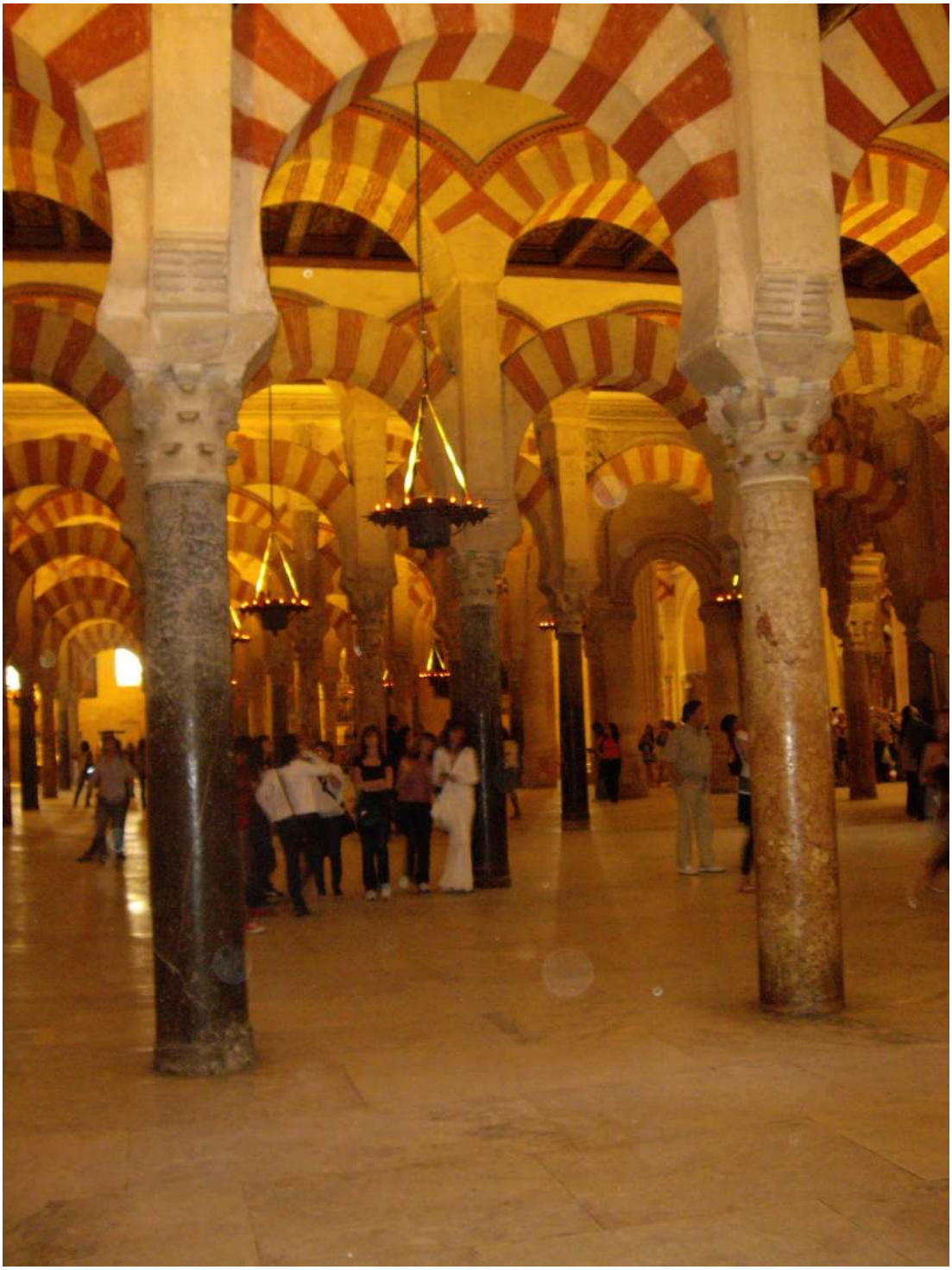


Figura 226: Mezquita de Córdoba, naves de la primera etapa. *Cordoba Mosque, First stage naves.*

Figura 227: Acceso al patio y entrada hacia la sala.
Access to the patio and entry into the hall.

The Great Mosque of Córdoba: a masterpiece based on an elemental pattern.

Emir Abd al-Rahmaán I ordered the Great Mosque of Cordoba to be built in 785 on the site of the Church of Saint Vincent, after Cordoba had been made the capital city of the caliphate. Work on the mosque took about one year.
As is well known, this first work is now only a part of the current Mosque, which is the result of successive expansions.
The first building had both of the major elements that it would continue to have in the future: an entry patio, figure 227, and a large hypostyle hall dedicated to the salat, figure 226, the five daily prayers. If there were a great many faithful then it was also possible to pray in the patio; this is now called the "Patio of the Orange Trees", figure 228.
This marvellous patio may remind us that there can be no better sunshade than a tree next to a small sheet of water.
This first building was composed of eleven open spaces oriented to the quibla; the south-facing wall (although it was made with the intention of facing Mecca), towards which the faithful prayed. The specific focus of attention in the quibla is the mihrab, which in this case is a small enclosure (from the time of Al-Hakam II), figure 229.
Each open space or nave in this first stage is 6.86 m wide, figur2 226, except for the central one which coincides with the mihrab. This is 7.85 m wide and is also slightly higher than the others. This gives rise to a total nave width of approx. 79 m and a depth of approx. 42 m.

La Gran Mezquita de Córdoba: una obra maestra con base en una trama elemental.

La Gran Mezquita de Córdoba se ordena construir, en el emplazamiento de la Iglesia de San Vicente, por orden del emir Abd al-Rahmaán I en el año 785, una vez que Córdoba se erige como capital del califato. Las obras duran en torno a un año.
Como es bien sabido, esa primera obra es sólo una parte de la actual Mezquita, fruto de sucesivas ampliaciones.
La construcción inicial tenía los dos grandes elementos que luego se seguirán manteniendo: un patio de acceso, figura 227, y una gran sala hipóstila dedicada al salat, figura 226, las cinco oraciones diarias. En caso de mucha afluencia de fieles se podía orar también en el patio, ahora llamado "Patio de Los Naranjos", figura 228.
Ese maravilloso patio nos puede hacer recordar que no hay mejor "parasol" que un árbol junto a una pequeña lámina de agua.
Esa primera construcción se compone de once crujías orientadas a la quibla (muro orientado a Sur, aunque hecho con intención de mirar hacia la Meca), y al que los fieles dirigen sus rezos. El foco concreto de atención dentro de la quibla es el mihrab, formado, en este caso, por un pequeño recinto de la época de Al-Hakam II, figura 229.
Cada crujía o nave de esa primera etapa tiene 6,86 m de ancho, figura 226, salvo la central, que coincide con el mihrab, que tiene 7,85 m de anchura y es ligeramente más alta que el resto. Eso supone una anchura de naves de unos 79 m y una profundidad de unos 42 m.

Figura 228: Patio de los Naranjos. *Patio of the Orange Trees.*

Figura 229: Cúpula del Mihrab. *Mihrab dome.*

In this first work all of the supports were taken from Roman and Visigoth buildings, partially explaining how quickly it was built. The roof is composed of wooden beams, which brace a collar-beam structure and is mainly about 10 m high. The pillars in the direction of the naves stand from 2.5 m to 3 m apart, so that they draw the gaze towards the quibla.

The plundered pillars were too short for the height of the nave, figure 226, so that it was necessary to extend them using rectangular stone plugs. To increase stability there is an intermediate arch as well as the upper one, like some Roman aqueducts. This double arch forms a diaphragm in the direction of the quibla, emphasising this direction once again. This is not an isotropic space.

The first expansion took place under Abd al-Rahmán II, from 833 to 848, increasing the length of the naves by moving the quibla more to the south and going from a depth from about 42 m to about 69 m; this made the hall almost square, at 79 m × 69 m.

Abd al-Rahmán III centred his interest on the palace-city of Medina Azahara (936-1010), and he only expanded the patio of the Mosque and built a new minaret. The latter disappeared when the catholic cathedral was built.

Al-Hakam II, the son of Abd al-Rahmán III, remodelled the Mosque from 962 to 966, moving the quibla and mihrab southwards once again to create a hall about 115 m deep with the same width, 79 m.

The final expansion (987-988) was ordered by Almanzor, the prime minister and regent of the Caliph Hisham II. Eight new naves were added on the east side, each of which has a width of a little more than 6 m, keeping the position of the quibla. This added a total of 50 m, so that the space in the hypostyle hall is almost a square once again. The patio was also expanded in the same way.

The south wall was 128.41 m long. The measurements of the hall for the salat amounted to approximately 114 m × 128 m. At this size the pattern takes on a certain infinity. The patio then measured approximately 60 m × 128 m. The mosque including the frontal patio had now reached its final size of 175 m × 128 m. Not bad.

The type of support and diaphragm with arches changed with each expansion, figure 230. Nevertheless, the work continued to possess extremely strong compositional unity.

En esa primera actuación, todos los soportes proceden del expolio de obras romanas y visigóticas. De ahí, en parte, la rapidez de su construcción. La altura tipo al techo, formado por una viguería de madera que atiranta una estructura de par y nudillo, es de unos 10 m. Los pilares, en la dirección de las naves, se sitúan a distancias de entre 2,5 m y 3 m, de manera que se potencia la mirada hacia la quibla.

Los pilares expoliados eran cortos para la altura de la nave, figura 226, y fue necesario prolongarlos con machones de fábrica de sección rectangular. Para su estabilidad, además del arco superior se dispone otro intermedio, al modo de algunos acueductos romanos. Ese doble arco forma un diafragma en dirección a la quibla, potenciando de nuevo esa dirección. No es un espacio isótropo.

La primera ampliación se produce con Abd al-Rahmán II, entre el 833 y el 848, que amplió la longitud de las naves desplazando la quibla más al sur, pasando de una profundidad de unos 42 m a otra de unos 69 m; con lo que dicha sala pasó a ser casi cuadrada, 79 m × 69 m.

Abd al-Rahmán III centró su interés en la ciudad palaciega de Medina Azahara (936–1010), y se limitó a ampliar el patio de la Mezquita y construir un nuevo alminar, que desapareció con la construcción de la catedral católica.

Al-Hakam II, hijo de Abd al–Rahmán III, remodeló la Mezquita entre el 962 y el 966, moviendo quibla y mihrab de nuevo hacia el sur, hasta conseguir una sala de unos 115 m de fondo (con los mismos 79 m de anchura).

La última ampliación (987–988) fue ordenada por Almanzor, primer ministro y regente del califa Hisham II, quién añadió ocho nuevas naves hacia el este, con un ancho de crujía de poco más de 6 m, manteniendo la posición de la quibla. Con ello se incorporan 50 m más, de manera que el espacio de la sala hipóstila vuelve a ser casi un cuadrado. El patio se amplia de la misma manera.

La longitud de muro sur llegaba a 128,41 m. Las medidas de la sala para la celebración del salat ascendían, aproximadamente, a 114 m × 128 m. Con esa dimensión la trama adquiere cierta infinitud. El patio mide entonces, aproximadamente, 60 m × 128 m. De este modo, la mezquita, incluido el patio delantero, había alcanzado su tamaño final de 175 m × 128 m. No está mal.

El tipo de soporte y diafragma con arcos irá cambiando con cada ampliación, figura 230. Pero la obra seguirá teniendo una unidad compositiva fortísima.

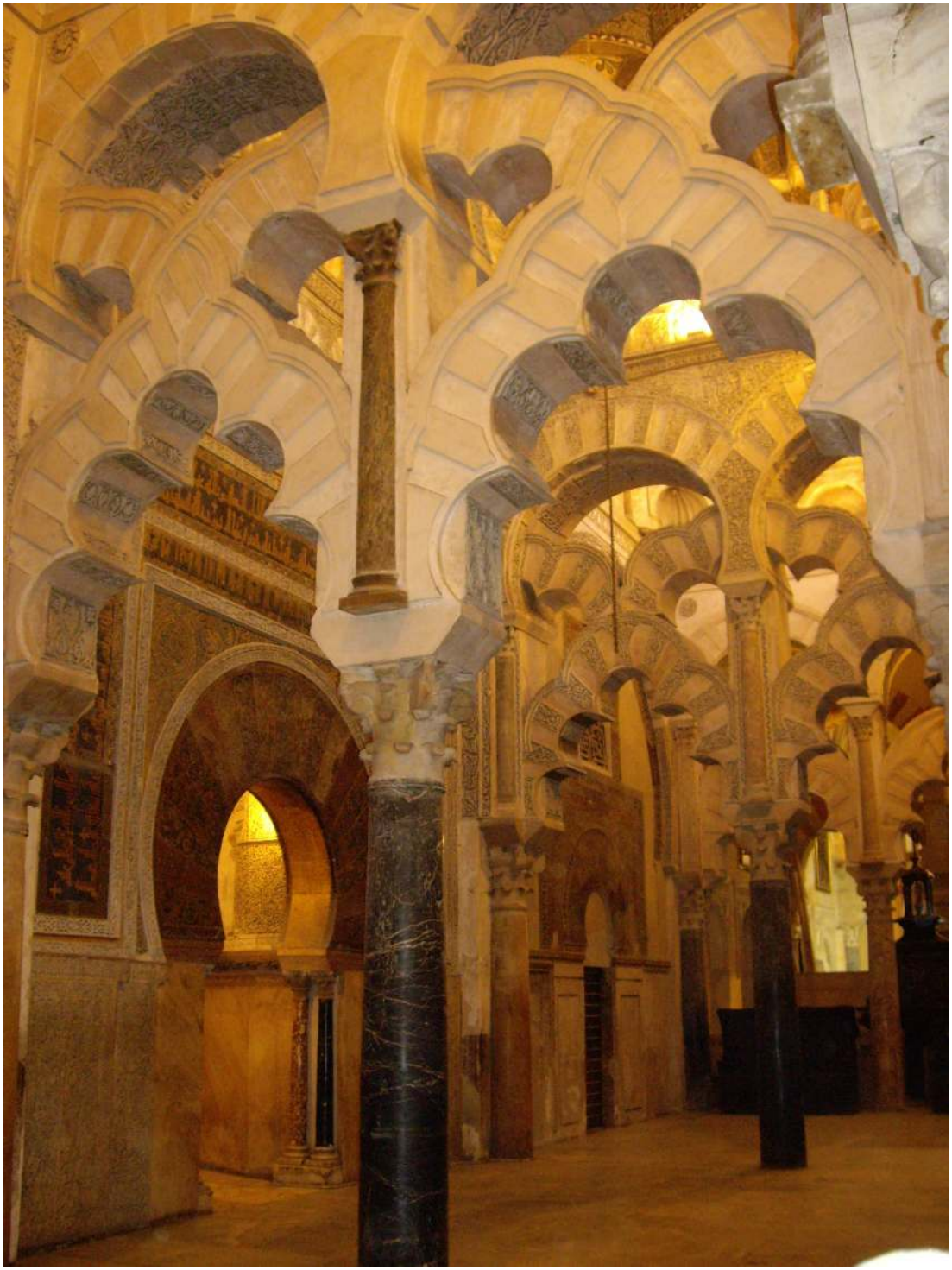


Figura 230: Soportes y arquerías de una de las ampliaciones. *Supports and a series of arches in one of the expansions.*

Shortly after the conquest of Granada, which ended the Reconquest, in 1523 it was decided to insert a catholic cathedral into the heart of the mosque, removing 63 columns; this work took three centuries. It was not a fortunate decision, although the fact that the mosque was not destroyed, in the same way that the Alhambra in Granada was preserved, in fact was an expression of great admiration for Andalusian culture and architecture.

In a recent interview the well-known architect Jacques Herzog (J. Herzog, 2015), praised the Mosque in Cordoba and said it was his favourite work. Other well-known architects were asked by the same journalist in a series of interviews to choose their favourite work. Interestingly, only one of them chose a relatively recent work. The others all chose works built centuries ago. Although I do not find that surprising, it is still paradoxical.

The architect Peter Zumthor talks about the creation of "atmospheres" (Zumthor, 2006) as the heart of architecture, and I agree with him. The patio and hypostyle hall of Cordoba Mosque are two of the most moving spaces that I have seen. They submerge you in an atmosphere of peace, freshness and shade which encourages prayer.

The use of a regular pattern that is directional in this case is no less important. I am sure that patterns too are, in composition, at the heart of architecture. Structure gives form to the pattern, but not as something to be shown or expressed independently, but rather organising space; creating a simple clear "structure" in the broadest sense of the term. It is classical handling of structure.

The lack of light in this pattern, with naves measuring from 6 m to 7 m and supports from 2.5 m to 3 m tall, which is completely associated with the simplicity of the construction, supports the atmosphere of devotion which is created. Moreover, in these historical works construction and structure are almost one and the same.

It is true that some of the expansions are decorated ostentatiously. These things are inevitable and are dictated by the historical context. Yet even so, this work overflows with simplicity and devotion.

The role of ornamentation, although it differs from one expansion to another, is fundamental in this work. It reminds us that a work is the sum of many things; that an architect does not project a structure, but rather a work. An "atmosphere", as Zumthor says.

And at the same time, as a specialist in structures, this work never fails to arouse my admiration. Isn't this *structural art*, too? I believe that it is.

Poco después de la toma de Granada, y finalizada con ello la reconquista, en 1523 Carlos V decide insertar una catedral católica en el corazón de la Mezquita, retirando 63 columnas. La obra durará tres siglos y el resultado no fue nada afortunado. Aunque el hecho de no derribarla, al igual que pasó con la Alhambra de Granada, implicaba, de alguna manera, una gran admiración por la cultura y la arquitectura andalusí.

En una reciente entrevista, el conocido arquitecto Jacques Herzog , este elegía la Mezquita de Córdoba como su obra favorita (J. Herzog, 2015). Otros prestigiosos arquitectos fueron también conminados por la misma periodista, en una serie de entrevistas, a elegir su obra favorita. Curiosamente, solo uno eligió una creación relativamente reciente. El resto se quedó con obras construidas hace siglos. No me extraña, pero no deja de ser paradójico.

El arquitecto Peter Zumthor habla de la creación de "atmósferas" (Zumthor, 2006) como el corazón de la arquitectura. Yo comparto ese punto de vista. El patio y la sala hipóstila de la Mezquita de Córdoba son dos de los espacios más emocionantes que haya visto. Te sumergen en una atmósfera de tranquilidad, frescura y penumbra propicia para el rezo.

El uso de una trama regular, direccional en este caso, no es algo menor. Estoy convencido que las tramas son, en lo compositivo, también el corazón de la arquitectura. La estructura da forma a esa trama, pero no con objeto de exhibirse o expresarse de manera autónoma, sino organizando el espacio, creando una "estructura" simple y clara, en el sentido más general del término. Es un manejo clásico de la estructura.

La escasa luz de la trama, con naves de entre 6 m y 7 m y soportes de 2,5 m a 3 m, que está totalmente asociada a una simplicidad constructiva, no hace más que apoyar la atmósfera de recogimiento creada. En estas obras históricas, además, construcción y estructura son casi un mismo concepto.

Es cierto que alguna de las ampliaciones tiene una ornamentación ostentosa. Son cosas inevitables, dictadas por el contexto histórico. Con todo, la obra rezuma sencillez y sosiego.

El papel del ornamento, aunque distinto según las ampliaciones, es fundamental aquí. Nos recuerda que una obra es la suma de muchas cosas; que un arquitecto no proyecta una estructura, sino una obra completa. Una "atmósfera", como dice Zumthor.

Y al mismo tiempo, como especialista en estructuras, esta obra no deja de causarme admiración. ¿No es esto también *Structural Art*? Yo creo que sí.

Figura 231: La iglesia de Myyrmäky, vista del altar. *Myyrmäky church, view of the altar.*

Figura 232: Techo de la iglesia con lucernarios. *Cover of the church with skylight.*

La iglesia de Myyrmäky

Figura 233: Imagen exterior de la iglesia.
Exterior view of the church.

Myyrmäky Church
masterly handling of light.

Myyrmäky Church (1984), Finland, figure 233, is by the architect Suha Leiviskä. It is organised in a singular way. It is an elongated space, and the altar is centred on a side wall, not at the end as would be usual. This side wall is windowless, while the opposite one has small niches.
Most of the light enters here through the roof, figure 231, above the windowless wall where the altar stands. This light bath is white. The interior finishes on the walls and ceiling form a subtle play of small mouldings and niches.
The roof structure leaves the system of beams visible, figure 232. This structure could not be simpler, a lintel system of the most traditional type.
Space here is constructed using light, colour and ornamental finishes, the most immaterial aspects of this work. The role of structure here is completely secondary, and it is treated with great simplicity and sincerity, as it should be. This is a wonderful work.

Iglesia en Myyrmäky
un manejo magistral de la luz.

La iglesia de Myyrmäky (1984), en Finlandia, figura 233, es obra del arquitecto Suha Leiviskä.
La organización es singular. En un espacio alargado, el altar está situado en un lateral, y no al fondo, como sería usual. En ese lateral, el muro es ciego. En el muro opuesto se abren pequeños huecos.
Pero es en cubierta donde se produce la mayor entrada de luz, proyectándose sobre ese muro ciego donde está el altar, figura 231. El color blanco acompaña a ese baño de luz. Los acabados interiores, en paredes y techo, se recrean en un sutil juego de pequeñas molduras y huecos.
La estructura de cubierta no puede ser más sencilla, figura 232, un sistema adintelado de lo más tradicional.
El espacio se construye con luz, color y unos acabados ornamentados; es decir, con lo más inmaterial. La estructura tiene aquí un papel totalmente secundario, se trata con gran sencillez y sinceridad, como tiene que ser. Es una obra estupenda.

Figura 234: Vista exterior del CNIT, París. *Exterior view of the CNIT, Paris.*

Edificio CNIT, París

CNIT building:
Esquillan, a company engineer.

The National New Industry and Technology Centre (Centre National des nouvelles Industries et Techniques, CNIT) (1956-58), figure 234, which is now known as the Centre des nouvelles Initiatives et des Tendances, is located in La Défense quarter of Paris.
It is by the architects Robert Edouard Camelot, Jean de Mailly and Bernard Zehrfuss, while Jean Prouvé worked on the facade system and the engineer Nicolas Esquillan worked on the structure.
Bernard Zehrfuss is the most important of this group of architects, and he is known above all for the Paris UNESCO Headquarters, which has a structure by Nervi, and the Gallic-Roman Museum in Lyon. These works depend heavily on structure for their composition. Nevertheless, I believe that Prouvé and Esquillian are the two key people in this work. Both of them are authorities in their field, and this can be seen here.
The work was altered in 1988 and 2009. The interior space became very cluttered, figure 235, greatly reducing the natural lighting, which comes solely from the facades. The result has not been very fortunate. It is not possible to block the entry of natural light and think that this will not affect a space that spans 218 m. Light and structure are an indissoluble couple. Many works have paid the price for ignoring this.
This is a dome with an equilateral triangular base spanning 218 m. It is still the largest of these to be made with concrete. Esquillan uses a range of arches which have three starting points, and their load on the keystone is counterbalanced by three symmetrical ribs. The overall slenderness ratio stands at approximately 4.5, which is stupendous for an arch. The ribs are 1.8 m wide, giving them a slenderness of 121. Between the ribs at both ends there are concrete domes only 6.5 cm thick, so that actually this is a double layer structure. Each rib is braced with bulkheads every 9 m.
We could say that the design of this structure has a lot to do with Gothic ribbed domes, while allowing for all of the things that differentiate them.

Edificio CNIT:
Esquillan, un ingeniero de empresa.

El Centro Nacional de nueva Industria y Tecnología (Centre National des nouvelles Industries et Techniques, CNIT) (1956–58), figura 234, actualmente denominado Centre des nouvelles Initiatives et des Tendances, está ubicado en el área de La Défense en Paris.
Es obra de los arquitectos Robert Edouard Camelot, Jean de Mailly y Bernard Zehrfuss, Jean Prouvé en el sistema de fachada y el ingeniero Nicolas Esquillan en la estructura.
Dentro del grupo de arquitectos, Bernard Zehrfuss es el de más peso, conocido sobre todo por la la Sede de la UNESCO de Paris, que tiene una estructura de Nervi, y el Museo Galo-Romano de Lyon, obras en la que se apoya muchísimo en la estructura para componer. Pero, en mi opinión, Prouvé y Esquillian son las dos personas claves en esta obra. Ambos eran autoridades en su campo, y se nota en la obra.
El edificio se reforma en 1988 y 2009, colmatando el espacio interior, figura 235, y reduciendo la iluminación natural, que solo procede de las fachadas. El resultado no ha sido muy afortunado. No se puede obturar la entrada de luz natural y pensar que no va a afectar a un espacio de 218 m de longitud. Luz y estructura son pareja indisociable. Muchas obras han pagado el precio al pasarlo por alto.
Se trata de una bóveda de base triangular equilátera con una luz de 218 m. Todavía sigue siendo la más grande construida con hormigón. Esquillan plantea un abanico de arcos desde los tres arranques, cuyos empujes en la clave se compensan con tres nervios simétricos. La esbeltez global es de, aproximadamente, 4,5, estupenda para un arco. Los nervios tienen 1,8 m de canto, lo que supone una esbeltez de 121. Entre nervios, en ambos extremos, dispone unas bóvedas de hormigón de solo 6,5 cm de espesor, de manera que, en realidad, es una estructura de doble capa. Cada nervio se arriostra con mamparos cada 9 m de distancia.
Podríamos decir que el diseño de la estructura tiene mucho que ver con las bóvedas de nervadura góticas, salvando las distancias.

Figura 235: Vista interior con los añadidos recientes.
Interior view with the new buildins added.

Figura 236: Fachada acristalada.
Glazed facade.

Figura 237: Detalle de la fachada.
Facade detail.

The commencements of the arch curves are inter-braced, although in a surprisingly broken pattern, for functional reasons. The design made it possible to use scaffolding, given the repetition of elements. Six bands were erected for each commencement of the arch in each stage. And the good thing is that the forces are counterbalanced. A high proportion of the elements were prefabricated, which makes far more sense thanks to the repetition of elements (18 almost identical bands per arch commencement).
Additionally, and importantly, the load is transmitted as quickly as possible to the arch commencements. The modulation here is highly optimised.
It is that Esquillan is a company engineer Marrey, 2006 Motro and Maurin, 2011. The design of this structure is totally linked to its construction.
Zehrfuss also presented a proposal together with Nervi, one that was more baroque and less effective, as well as notably more expensive. This is why Esquillan's tender won, as happened with the Crystal Palace (see page 205). This work is very costly and highly complex in technical terms. It was not the time to take risks. And moreover I believe Esquillan's project to be higher quality, I do not know whether to say in architectural or engineering terms, than Nervi's. It is not only a question of cost. Although you never know the degree to which these opinions are subjective.
Shortly afterwards Esquillan designed two other similar buildings: the Turin Exhibition Centre (1960) and the Ice Stadium for the Grenoble Winter Olympics (1967). The CNIT is probably better as a structure than it is as an architectural project. But even if that were so, it would not be the fault of either Prouvé or Esquillan. The concrete structure by Esquillan and Prouvé's facades, figures 236 and 237, are magnificent.

Los arranques se atirantan entre sí, aunque con un trazado quebrado por motivos funcionales, algo que sorprende. El diseño permitía ir aprovechando andamiajes, dada la repetición de elementos. Se montan seis bandas por arranque en cada etapa. Y lo bueno es que los empujes están compensados. La prefabricación de los elementos es muy alta, cosa que cobra mucho más sentido debido a la repetición de elementos (18 bandas casi iguales por arranque).
Además, y no es algo menor, se lleva la carga de la forma más rápida posible a los arranques. Tiene una modulación muy eficaz.
Y es que Esquillan es un ingeniero de empresa (Marrey, 2006 Motro y Maurin, 2011). El diseño de la estructura está totalmente ligado a su construcción.
Zehrfuss presenta también una propuesta junto con Nervi, más barroca y menos eficaz, y notablemente más cara. Por eso gana la propuesta de Esquillan. Como pasó en el Crystal Palace (véase la página 205). Se trataba de una obra muy costosa y de gran complejidad técnica. No era momento de arriesgar. Es más, creo que el proyecto de Esquillan tiene mayor calidad, no sé si llamarla arquitectónica o ingenieril, que el de Nervi. No es solo una cuestión de coste. Aunque uno nunca sabe qué parte hay de subjetividad en esas opiniones.
Esquillan diseñará poco después otros dos edificios similares: el Centro de Exposiciones en Turín (1960) y el Estadio de hielo de los Juegos Olímpicos de invierno en Grenoble (1967).
El CNIT tiene, probablemente, más valor como estructura que como proyecto de arquitectura. Pero si así fuera no sería culpa ni de Prouvé ni de Esquillan. La estructura de hormigón de Esquillan y las fachadas de Prouvé, figuras 236 y 237, son magníficas.

Figura 238: Vista general de The Iron Bridge. *General view of the Iron Bridge.*

Figura 239: Arranque de los arcos. *Start of the arches.*

The Iron Bridge en Coalbrookdale

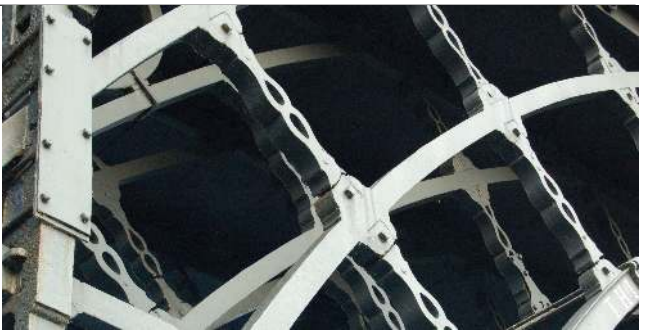


Figura 240: Detalle de las barras.
Detail of bars.

The Iron Bridge:
the first cast-iron bridge with a form inherited from stone bridges.

The Iron Bridge (1777-79, in Coalbrookdale, England, was projected by the architect Thomas Pritchard in 1775, and it was built by the ironmaster and builder Abraham Darby III, for which he was decorated by the Royal Society of Arts.
Nowadays we would not understand it if a bridge were called The Iron Bridge, or The Steel Bridge, to mention a material now widely used. But of course, when it is the first cast iron bridge in the world, things are different. It has a span of 30.6 m, which is not at all bad for a pioneering work.
Cast iron was then a fast-growing budding industry in Coalbrookdale. As well as meeting a need this bridge was also an advertisement. And it was a successful advertisement, as it was admired by architects and engineers all around the world. Each arch has a section of approximately 20 cm × 20 cm, figure 240. The photographs are deceptive. Some details recall the use of wood.
This bridge is of great interest here, as it is a good example of how the use of a new material takes time to consolidate. Normally at first types and forms are used which are associated with the use of other materials. The creation and consolidation of a new type, linked to a new material, is a process that usually takes some time and more than one work.
This bridge is clearly influenced by those made of stone. However, this transposition could not be made directly. The bridge has been repaired several times. Cast iron can hardly withstand traction forces, so that many of the parts have been broken by them, figure 240.
Nevertheless, this bridge opened up an unstoppable line of working. Subsequent works by T. Telford were fine examples of the use of cast and wrought iron. But half-way through the 19th century steel became cheap and fast to produce, sounding the death-knell for these earlier materials.

The Iron Bridge:
el primer puente de hierro fundido con una forma heredera de los puentes de fábrica.
The Iron Bridge (1777–79) en Coalbrookdale, Inglaterra, lo proyecta el arquitecto Thomas Pritchard en 1775, y lo construye el fundidor y constructor Abraham Darby III, a quien la Royal Society of Arts condecoró por ello.
Hoy no entenderíamos que un puente se llamara *The Iron Bridge*, o *The Steel Bridge*, por citar un material con gran uso hoy día. Pero claro, cuando se trata del primer puente de hierro fundido del mundo, la cosa cambia. Su luz es de 30,6 m, lo que no está nada mal para una construcción pionera.
El hierro fundido era una industria incipiente y en fuerte expansión en Coalbrookdale. El puente, además de cubrir una necesidad, iba a ser un elemento publicitario. Y lo logró, consiguió la admiración de arquitectos e ingenieros de todo el mundo.
Cada arco tiene una sección de aproximadamente 20 cm × 20 cm, figura 240. Las fotos engañan. Algunos detalles recuerdan a la madera.
El puente tiene gran interés para este libro, ya que es un buen ejemplo de cómo el uso de un nuevo material necesita tiempo para consolidarse. Lo normal es que, al principio, se utilicen tipos y formas ligados a otros materiales. La creación y consolidación de un nuevo tipo, unido a un nuevo material, es un proceso que suele requerir un tiempo y más de una obra.
En este caso, hay una clara influencia de los puentes de fábrica. Pero no se podía hacer esta trasposición de forma directa. El puente ha sido objeto de varias reparaciones. El hierro fundido no aguanta apenas tracciones, y muchas de las piezas están por ello rotas, figura 240.
Pero el puente abre una línea imparable. Las obras de T. Telford serán un ejemplo en el uso del hierro fundido y forjado. A mediados del siglo XIX se consigue producir acero de forma rápida y barata, y con ello mueren esos materiales.

Figura 241: Vista de los 7 arcos del nuevo Pont les Arts. *View of the 7 arches of the new Pont les Arts.*

Figura 242: Detalle del arranque de un arco. *Detail of the start of an arch.*

El Pont les Arts

Pont des Arts:
a triangulation with circumferential arches.

The Pont des Arts (1802-04) is by the engineer Alexandre de Cessart(1719-1806), and it was the first cast iron bridge over the Seine. It was replaced in 1984 with a steel bridge with 7 spans instead of the original 9. Originally the 9 arches had a span of 18.5 m and now each spans almost 24 mThis is a short span, but why use longer ones if they can be supported? There is almost no second order here, and the loads are transmitted directly to the supports, which is the most effective solution for a primary structure that is not very heavy.
In 1747 Alexandre de Cessart started to study in the École royale des ponts et chaussées, which had been created that same year by Jean-Rodolphe Perronet. This school soon changed its name to the École nationale des ponts et chaussées, the first civil engineering school in the world. Its importance has been underlined by an engineer as important as Michel Virlogeux (Virlogeux, 2002).
This is therefore a cutting-edge work, following in the footsteps of the English works which were in the vanguard (see page 231).
The arches are quite slender, following the philosophy of Perronet, making it possible to reduce the width of the piers. It forms a sort of continuous beam. The top of the bridge resembles a large street, which is something that is very pleasant. This is no small matter in the design of this bridge.
The elevation is in fact triangulated, although it uses circumferential arches in a repetitive pattern (we could look at this as if it were a fractal), figure 241. Although structurally it would be more logical to use straight bars, the resulting design would have been very different.
These slight deviations from geometrically more effective structures are common in engineering. And of course it is so too in building structures. It was very common in 19th century engineering. When done well it does not usually lead to any important cost increase. And this philosophy has produced magnificent works, such as this one. A bridge is far more than a structure.

Pont des Arts:
una triangulación con arcos de circunferencia.

El Pont les Arts (1802-04) es obra del ingeniero Alexandre de Cessart (1719-1806), y el primer puente de hierro fundido sobre el Sena. Se reemplazó en 1984 por otro de igual forma pero de acero, con 7 vanos en lugar de los 9 originales. En el primer puente, los 9 arcos tenían 18, 5 m de luz, ahora casi 24 m. Una luz pequeña. ¿Para qué más si se puede apoyar? Apenas se puede hablar de un segundo orden de elementos, las cargas van directas a los apoyos, lo más eficaz con una estructura primaria de poca entidad.
Alexandre de Cessart entra en 1747 en la École Royale des Ponts et Chaussées, creada ese mismo año por Jean-Rodolphe Perronet, escuela que poco después se convertiría en la École Nationale des Ponts et Chaussées, primera escuela de ingeniería civil del mundo. Su figura ha sido reivindicada por un ingeniero tan importante como Michel Virlogeux (Virlogeux, 2002).
Es una obra, por tanto, puntera, siguiendo las huellas de los puentes ingleses, que iban en cabeza (véase la página 231).
Los arcos son bastante esbeltos, siguiendo la filosofía de Perronet, que permitía reducir el ancho de las pilas. Se forma una especie de viga continua.
En la parte superior, el puente parece una gran calle, algo realmente agradable. No es esta una cuestión menor en el diseño de este puente.
El alzado está de hecho triangulado, aunque usando arcos de circunferencia, en un esquema recurrente (podemos verlo como un fractal), figura 241. Estructuralmente sería más lógico usar barras rectas, pero el resultado formal hubiese sido bien distinto.
Estas ligeras desviaciones respecto a formas estructuralmente más eficaces es algo habitual en ingeniería. Y, por supuesto, en estructuras de edificación. En la ingeniería del XIX eran más que frecuentes. Bien hechas no suelen suponer un incremento de coste importante. Y esa filosofía ha producido magníficas obras, como lo es esta. Un puente es mucho más que una estructura.

Figura 243: Iglesia de San Marcos, atrio. *Saint Mark's Church, atrium.*

Figura 244: Fachadas de ladrillo. *Brickwork facades.*

La iglesia de San Marcos

Figura 245: Bajorelive realizado en el pavimento con la imagen de San Marcos.
Low relief in the pavement with San Mark image.

La iglesia de San Marcos de Lewerenz: clasicismo moderno.

La iglesia de San Marcos (1956–63), *Markuskyrkan*, está situada en el distrito de Björkhagen, al sur de Estocolmo, figura 243. Es obra del arquitecto Sigurd Lewerenz (1885–1975), uno de sus mejores proyectos.

Lewerenz se educó en el clasicismo nórdico. Pero en su encuentro con el movimiento moderno va girando, produciendo obras, como esta, tan clásicas como modernas. Una arquitectura casi atemporal.

La obra se organiza en dos cuerpos, que separan lo sagrado y lo profano: en pequeño edificio administrativo y el edificio dedicado al culto, con espacios auxiliares. La separación crea un atrio, muy adecuado debido al entorno abierto en que se encuentra.

El ladrillo, con un tratamiento de detalle maravilloso, da un común denominador a todo el proyecto, figura 244. Pero luego se van produciendo diferencias.

El pequeño edificio administrativo, de una planta y poca altura, tiene una estructura de muros de carga de ladrillo y forjados de placas prefabricadas pretensadas de hormigón; pero formando una falsa bóveda, figuras 243 y 252. Esto facilita la evacuación del agua y la nieve; aunque nadie puede dudar de su fuerte impronta formal.

Esa mismas placas prefabricadas se usan en el edificio principal, salvo en la nave principal de la iglesia. Cuando las luces son mayores aparecen vigas de hormigón o, en una sala polivalente, de madera.

Así pues, los "espacios servidores", como los define Louis Kahn, tienen un tratamiento muy sencillo en todos los sentidos, incluyendo a la estructura. Esto es una postura no sólo clásica, sino también racional, de sentido común.

A medida que el espacio es más significativo, la estructura también lo es. La estructura de la pérgola del atrio es, por ello, singular, figura 247, lo que parece razonable. Está resuelta con soportes y vigas de madera laminada, con la cubierta formando falsas bóvedas, al estilo del pequeño edificio administrativo.

Saint Mark's Church, by Lewerenz: modern classicism.

Saint Mark's Church (1956-63), *Markuskyrkan*, stands in the district of Björkhagen, to the south of Stockholm, figure 243. It is by the architect Sigurd Lewerenz (1885-1975), and it is one of his finest works.

Lewerenz was educated in Scandinavian classicism. But when he discovered the modern movement he changed and began producing works like this one, which are as classical as they are modern: almost atemporal architecture.

This work is divided into two bodies, separating the sacred from the profane; there is a small administrative building and the building for worship, with auxiliary spaces. This separation creates an atrium, which is very suitable for the open setting.

The brickwork, with marvellous treatment of detail, is the common denominator of the whole project, figure 244. But differences arise, too.

The small administrative building is single storey and not very tall. Its load-bearing walls are brick and the roof is made of prestressed concrete slabs that form a false vault, figures 243 and 252. Although this facilitates the drainage of water and snow, nobody can doubt the power of this design.

The same prefabricated slabs are used in the main building, except in the nave of the church. When spans are greater, concrete beams appear or, in a multipurpose room, ones made of wood are used.

I.e., the subsidiary spaces, as Louis Kahn would say, are treated very simply in all senses, including structurally. This is not only classical, as it is also rational and common sense.

As spaces become more significant, so does their structure. Thus the structure of the pergola in the atrium is singular, figure 247, which seems reasonable. This structure has laminated wooden supports and beams, and the roof forms false vaulting, as it does in the small administrative building.

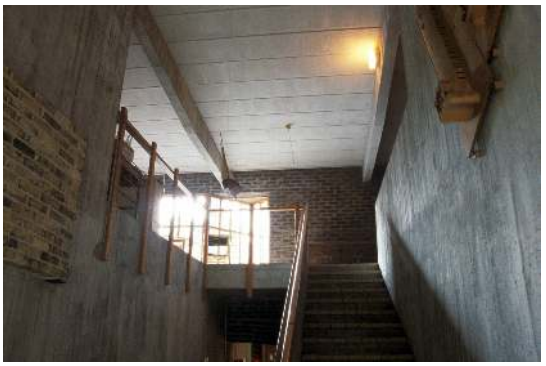


Figura 246: Estructura de los espacios secundarios del edificio pricipal. *Structure of the main building.*

Figura 247: Detalle de la marquesina de madera laminada del patio. *Detail of the patio canopy.*

Figura 248: Nave principal de la Iglesia. *Main nave of the church.*

Figura 249: Nave principal de la Iglesia. *Main nave of the church.*

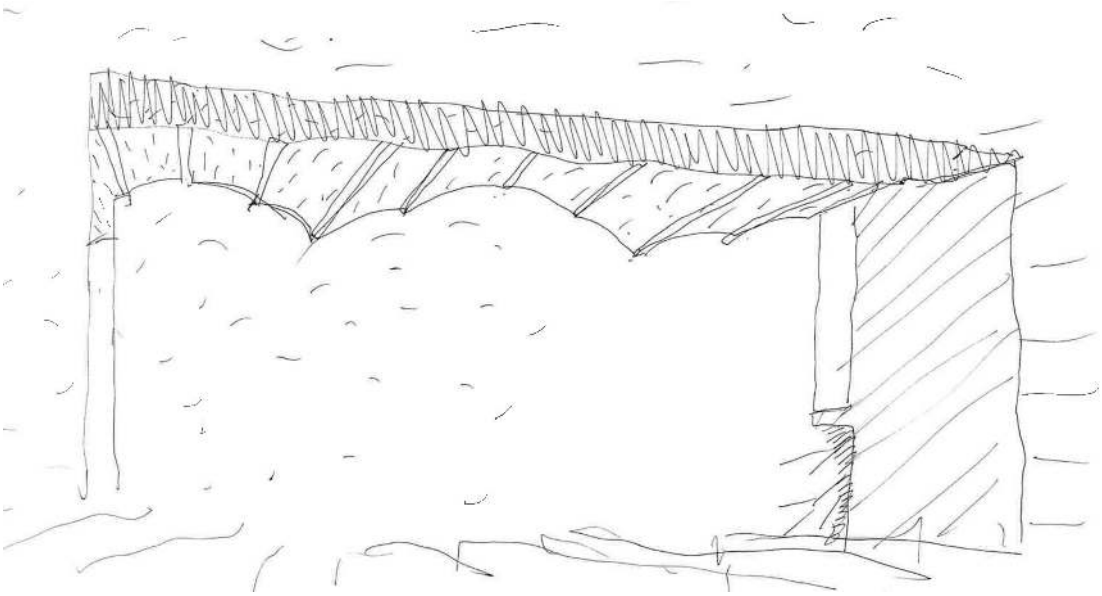


Figura 250: Nave principal de la Iglesia. *Main nave of the church.*

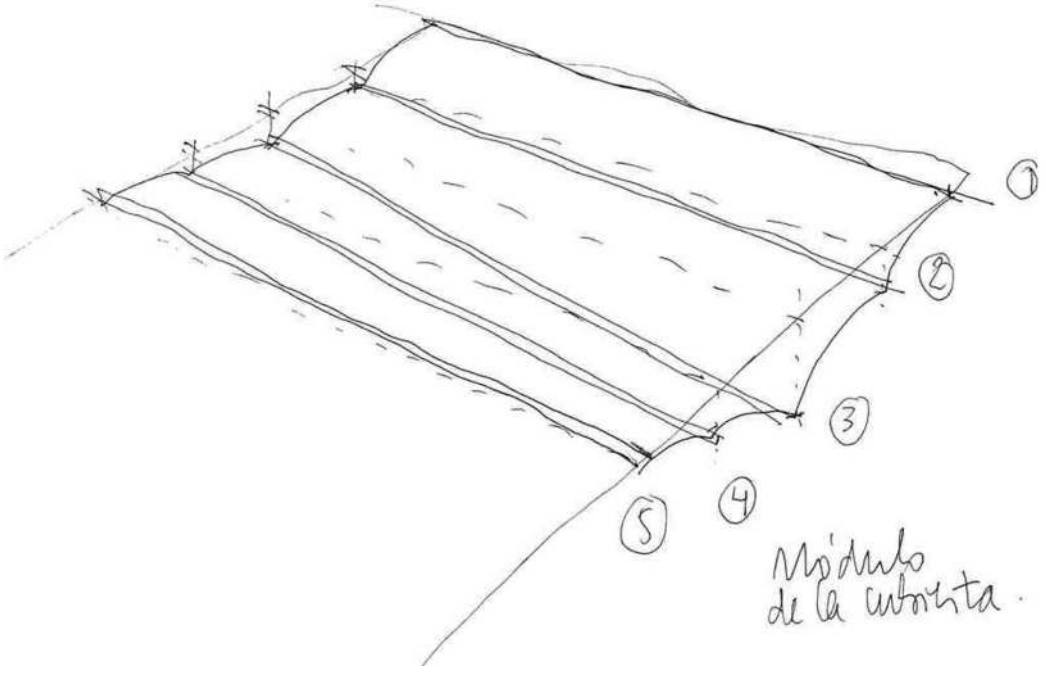


Figura 251: Módulo de la cubierta de la nave principal. *Module of the main nave.*

Figura 252: Estructura del edificio administrativo.
Structure of the administrative building.

Some people see the hull of a ship in the shape of the roof. The lintel structure, in two orders but not at all simple, forms a small sculpture, and there can be no argument about that. The decision to use wood was not a minor architectural choice. When analysed it has a structural logic which displays great knowledge of this material.
As could be expected, this work achieves its highest intensity in the space for worship, figures 248 and 249. The structure here is composed of large brickwork walls, in the same bricks that are used in the facades, while the roof uses steel beams between which brick sail vaults are formed. These vaults connect once again with the pergola and with the roof of the administrative building. This repetitive design is an infallible classic resource. The compositional mechanism of the roof recalls the one used by Gaudí in the Sagrada Familia Schools (see page 25.). I.e., although the main structure is based on a lintel, the change in the height of the supports creates a surprising effect. And even more so, when I was drawing this I realised that it is modular, too, figures 250 and 251, which does not stand out at all, figure 249.
Lewerenz takes care of every detail in this work. This is slow architecture. For example, he places a bas-relief of the image of Saint Mark in the entrance to the building close to the atrium, figure 245. This is ceramic and in the same colour as the facade, thereby sacralising this exterior space. I remember how moved I was when I found it. As can be seen, this structure is simple and uses the lintel system. It may be full of subtle touches, from the most conventional ones to other more symbolic areas where its form is far more singular. The structural decisions are marked by the overall project, as the structure here is not independent. Structure accompanies the intention of each part of the project.
How Lewerenz handles structure in this work is, I believe, a lesson in itself. But above all, this is a magnificent work of architecture.

Algunos ven en la cubierta un casco de barco. La estructura adintelada, en dos órdenes pero nada simple, forma una pequeña pieza escultórica, y eso sí es indiscutible. El uso de la madera no es una decisión arquitectónica menor. El despiece tiene una lógica estructural que demuestra un gran conocimiento del material.
Como era de esperar, la obra alcanza su mayor intensidad en el espacio destinado al culto, figuras 248 y 249. La estructura se forma con grandes muros de fábrica de ladrillo, el mismo usado en las fachadas, y una cubierta con vigas de acero entre las que se sitúan bóvedas baídas de ladrillo. Bóvedas que vuelven a conectar con las pérgolas y con la cubierta del edificio administrativo. Esa repetición formal es un recurso clásico infalible.
El mecanismo compositivo de la cubierta recuerda a lo hecho por Gaudí en las Escuelas de la Sagrada Familia (véase la página 25). Es decir, la estructura principal es adintelada, pero el cambio de la cota de apoyos crea un efecto sorprendente. Más aún, al dibujarla me di cuenta de que, además, era modular, figuras 250 y 251, cosa nada evidente, figura 249.
Lewerenz cuida cada detalle de la obra. Es una arquitectura hecha sin prisas. Como ejemplo, en los accesos al edificio, cerca del atrio, sitúa en el suelo un bajorrelieve con la imagen de San Marcos, figura 245, también cerámico y del color de la fachada. Con ello sacraliza ese espacio exterior. Recuerdo la emoción que me causó su hallazgo.
Como se ve, una estructura simple, adintelada, puede estar llena de matices, desde lo más convencional a otras áreas más simbólicas donde la forma es mucho más singular. Las decisiones de estructura las marca el proyecto global, no la estructura de manera independiente. La estructura acompaña a la intención del proyecto en cada parte. El manejo de la estructura que realiza Lewerenz en la iglesia de San Marcos es, en mi opinión, toda una lección. Pero ante todo, es una magnífica obra de arquitectura.

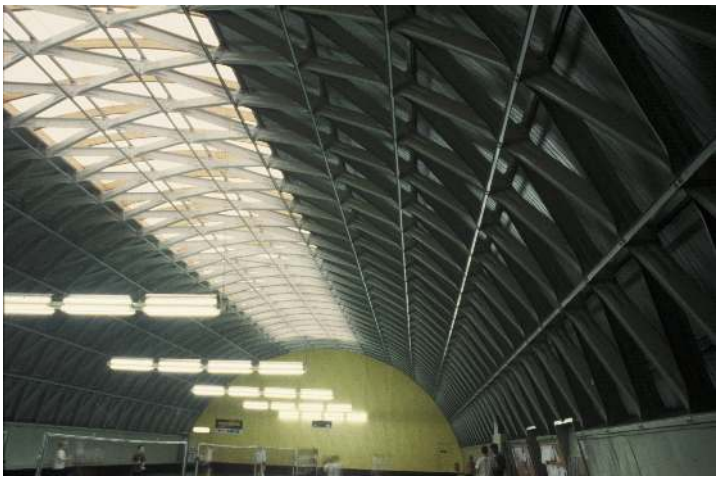


Figura 253: El sistema Junkers tipo lamela.
Junkers' lamela type system.

Figura 254: Detalle de la unión.
Detail of a joint.

El sistema Junkers tipo lamela

**The Junkers lamella system:
the influence of the aeronautic industry.**

In 1924 Hugo Junkers (1859-1935) patented a lamella type system, and he added improvements to it in 1925. As a lamella system it was similar to Zollinger's system in wood that he had patented in 1921, although Junkers used steel, figure 253.
Junkers had been trained as a mechanic and engineer, although he was also a businessman and scientist. He founded the Junkers and Co. Companies in 1895, and Junkers Flugzeugwerke AG, in 1919, in Dessau; the latter worked on aircraft design, although it also had a department working on the design of bridges and pavilions. The influence of aeronautical construction on this pavilion is clear (see page 243). In 1933 the Nazi government forced him to leave his factories, and he was not even allowed to visit them.
The lamellas were from 1.5 m to 2.5 m long, with a maximum separation of 0.5 m. These shaped steel sections were from 3 mm to 6 mm thick. The fold gives the necessary inertia, although it changes at the ends to facilitate joining, figure 254, which was by bolts and nuts. This permitted rigid joints. Transversally, two more shaped sections ensured lateral stability. This design was really innovative.
The majority of the roofs made were semicircular in cross-section, although some were also made in the cross-section of a pointed arch. There were four standard types with spans of from 20 m to 40 m. This system was not thought to be economically justified for shorter spans. For more details see Weller, Tasche and Baatz, 2009.
Few examples were built. The photographs here show a building in the Copenhagen suburbs that is currently used for sports. It is next to other wooden Zollinger-type buildings, which is surely not by chance.
The Zollinger-type buildings were far more successful. The key to this was that any carpenter could make one, as it was an open system. Junkers' system was closed. And building in small cross-section sawn wood was cheaper than using steel. Junkers' prefabricated system has very solid structural and constructive logic. This is of great value in itself, given that it offers not only a closed patent, but also supplies ideas for future solutions.
After which, turning this system into good architecture depends on the technician who prepares each project.

**El sistema Junkers tipo lamela:
influencia de la industria aeronáutica.**

Hugo Junkers (1859–1935) patenta en 1924, con mejoras en 1925, un sistema de tipo lamela similar al Zollinger de madera, patentado en 1921, pero usando acero, figura 253. Junkers, ingeniero mecánico de formación, fue también empresario y científico. Funda las compañías *Junkers and Co*, en 1895, y *Junkers Flugzeugwerke AG*, en 1919, en Dessau; la última vinculada al diseño de aviones. Dentro de ella había un departamento dedicado al diseño de puentes y pabellones. La influencia de la construcción aeronáutica en esta nave es clara (véase la página 243). En 1933, el gobierno nazi le obliga a dejar sus fábricas sin poder siquiera visitarlas.
La longitud de las lamelas era de 1,5 m a 2,5 m, situadas a una separación máxima de 0,5 m. Se trata de perfiles conformados de acero con espesores de 3 mm a 6 mm. El plegado da la inercia necesaria, pero cambia en los extremos para facilitar la unión, figura 254, realizada mediante tornillería. Esto posibilitaba uniones rígidas. Transversalmente, otros dos pequeños perfiles de acero conformado aseguran la estabilidad lateral. El diseño fue realmente innovador.
La mayoría de las cubiertas realizadas tenían sección semicircular, pero también se hicieron con sección de arco apuntado. Se tipificaron cuatro variantes con luces de 20 m a 40 m. Por debajo de esa luz no se consideran rentables. Para más detalles véase Weller, Tasche y Baatz, 2009.
Se construyeron pocos ejemplos. Las fotos que aquí se muestran son de una nave de las afueras de Copenhague, para uso deportivo. Están al lado de otras construcciones tipo Zollinger de madera. Seguro que no es casual.
La suerte de las Zollinger fue mucho mejor. La clave estaba en que cualquier carpintero podía montarla, era un sistema abierto, el de Junker era cerrado. Y construir con madera aserrada de pequeñas secciones era más barato que hacerlo con acero.
El sistema prefabricado de Junkers tiene una lógica estructural y constructiva muy sólida. Eso ya tiene un gran valor en sí mismo, ya que no solo ofrece una patente cerrada, también aporta ideas para soluciones futuras.
A partir de ahí, el convertirlo en buena arquitectura depende del técnico que desarrolle cada proyecto.

Figura 255: Estructura del Junkers Ju 52.
Junkers Ju 52, structure.

Figura 256: Detalle de la estructura del Junkers Ju 52.
Junkers Ju 52, detail of the structure.

Figura 257: Estructura del fuselaje del Airbus A320.
Airbus A320 structure.

Figura 258: Detalle de las barras del Junkers Ju 52.
Detail fo bars of Junkers Ju 52.

Aeronautical structures:
transfers to civil engineering and building.

When describing Junkers' lamella-type structural patent (see page 251.), aeronautical construction was said to have influenced its design.
In this case the influence was extremely direct, as Hugo Junkers produced aircraft. His first company, Junkers and Co (JCO) was founded in 1895. Among other aircraft it manufactured the Junkers Ju 52, which was designed at the end of the 1920s and flew for the first time in 1930.
The Deutsches Museum in Munich contains an example of this aircraft, figures 255 to 258.
The joints are riveted and bolted, the sheet metal is bent and shaped, there are tubular sections bent at the ends to facilitate joints, shaped sections with varying cross-sections at the ends to makes better joints, figure 258. This last image reminds us very much of the lamella-type structure.
The Deutsches Museum also contains an Airbus A320, the fuselage frame of which also contains shaped section technology, figure 257.
And there is also Finite Element analysis, which was developed in the aeronautical industry. In no other field is weight optimisation so crucial, so it was developed there in theory and in practice, above all.

Estructuras aeronáuticas:
transferencias hacia la construcción civil y la edificación.

Al hablar de la patente de estructuras tipo lamela de Junkers (véase página 251), se comentaba la influencia de la construcción aeronáutica en el diseño de esa estructura. En este caso además es directísima, porque Hugo Junkers producía aviones. Su primera compañía, *Junkers and Co* (JCO) se fundó 1895. Fabricó, entre otros, el avión *Junkers Ju 52*, que se diseño a finales de los años 20 y efectuó su vuelo inaugural en 1930. El *Deutsches Museum* de Munich muestra un ejemplar, figuras 255 a 258.
Uniones con remache y tornillería, chapa plegada y conformada, perfiles tubulares plegados en los extremos para facilitar la unión, perfiles conformados con cambios de sección en el extremo para una mejor unión, figura 258. Esta última imagen nos recuerda mucho a lo realizado en la estructura tipo lamela.
El *Deutsches Museum* muestra, también, un Airbus A320. El armazón del fuselaje tiene así mismo tecnología de perfiles conformados, figura 257.
Por no hablar del desarrollo del análisis. El método de los Elementos Finitos nace en la industria aeronáutica. Y no hay campo en donde la optimación del peso sea tan crucial y, por tanto, esté tan desarrollada en teoría y, sobre todo, en la práctica.

Figura 259: Cubierta de nave industrial en Madrid. *Industrial building cover in Madrid.*

Figura 260: Detalle del extremo de la nave. *Detail of the end of the nave.*

Nave industrial en Bravo Murillo

**Industrial building in Bravo Murillo, Madrid:
Prefabricated structural systems.**

Figure259 shows an industrial building that existed a few years ago in calle Bravo Murillo Madrid, close to where it crosses calle Castilla.
It consisted of a prefabricated system for industrial buildings. I have no data on the manufacturer or the technicians who were responsible for this work. This was probably built between the end of the 1950s and the end of the 1960s. Concrete was used then rather than steel, as it was cheaper. And steel was limited to bars for the same reason.
The roof is composed of a prefabricated concrete slab with a short span of about 1.5 m. Then the only structural order appears, composed of a truss. Upright rafters are added in **V**, with struts too to reduce flexion. Concrete then was used under flexion-compression, while steel rebar was used under traction. The philosophy of these designs derives from truss design by the French engineer Jean-Barthélémy Camille Polonceau (1813-1859).
At the time it was possible to leave small cross-section steel visible. Even the concrete has small cross-sections. This solution would not be viable today due to current regulations on fire resistance.
This is not author architecture. If there is any doubt as to this, it is enough to look at the ends, figure 260, where the floor plan is somewhat irregular. Adapting the standard solution to that edge speaks for itself. It is also possible to see that more than one system was used to reduce flexion of the main rafters.
But the standard solution here has its own indisputable structural and constructive logic. The entry of light at the top is well designed. This work is very noble, and it displays expertise. And in the hands of a good designer it could lead to a very high quality architectural job.

**Nave industrial en Bravo Murillo, Madrid:
sistemas de estructura prefabricados.**

La figura 259 muestra una nave industrial que existía, hasta hace unos años, en plena calle Bravo Murillo de Madrid, cerca del cruce con la calle Castilla.
Se trata de un sistema prefabricado para naves industriales. No tengo datos de la empresa fabricante ni de los técnicos que firman esta obra. Es probable que se trate de soluciones de entre finales de los 50 y finales de los 60.
Se potencia el uso del hormigón frente al acero, más barato en ese momento. Por eso el acero se limita a redondos.
El forjado está formado por una placa prefabricada de hormigón, de una luz reducida, en torno a 1,5 m. Después, aparece el único orden estructural formado por una cercha. Se añaden montantes en **V** al par, también atirantados, para reducir la luz a flexión. El hormigón se usa entonces en flexo-compresión y el acero, en barras de armado, en tracción. Se trata de diseños que, en su filosofía, derivan del diseño de cerchas del ingeniero francés Jean-Barthélémy Camille Polonceau (1813–1859).
Es una época en la que el acero, con esas secciones pequeñas, se podía dejar visto. Incluso en el hormigón las secciones son pequeñas. Con los requisitos actuales sobre resistencia a fuego, esta solución no sería viable.
No es arquitectura de autor. Si hubiera alguna duda basta mirar a los extremos, figura 260, donde la planta es algo irregular. La adaptación de la solución estándar a ese borde habla por sí misma. Ahí se aprecia, además, que se disponía de más de una configuración para reducir la flexión de los pares.
Pero la solución tipo tiene una lógica estructural y constructiva indudable. La entrada de luz cenital está bien resuelta. La obra tiene una gran nobleza y oficio. En manos de un buen diseñador puede producir una obra de gran calidad arquitectónica.

Figura 261: Nave industrial prefabricada de hormigón, detalle de empotramiento de viga y soporte.
Prefabricated concrete industrial building, detail of how the beam and support fit together.

Figura 262: Detalle de la viga, acartelada y con sección variable.
Detail of the variable cross-section corbelled beam.

Nave industrial prefabricada

Figura 263: Vista general de la estructura de la nave.
General view of the structure of the building.

Prefabricated concrete industrial building: impeccable constructive and structural logic.

Figure 263 shows the structural skeleton of a prefabricated concrete industrial building located in the Madrid mountains. The work was abandoned, and I do not know why. This images looks sculptural and rather dreamlike, helped no doubt by the bulls standing around it. And it is also anthropomorphic, like two hands touching at the tips of their fingers.
This is an efficient and refined prefabricated system; and it is also easy to disassemble for transport.
The supports, figure 261, have a corbel to support the two central beams, which are also under construction. A subsequent joint at the top of the support forms a rigid connection.
On the other hand, both of the central beams, figure 262, not only have corbelling along their direction line but also vary in cross-section along the same, with a width and edge that increase towards the point which rests on the supports. At their central joint they do in fact form an articulated joint.
They support tie-beams which are prefabricated too, and have the approximate cross-section of a double **T**.
The bases too are probably prefabricated. I do not know if they will have been prestressed. Although this solution is very suitable for supports and tie-beams, it is probably neither necessary nor economically positive in this case.
This is an expert design. These systems compete based on their economic advantages rather than their design in itself. However, as has happened so often, it is usually simple to create a good work on the basis of a good design. When the structure can be seen in isolation this is even clearer.

Nave industrial prefabricada de hormigón: una impecable lógica constructiva y estructural.

La figura 263 muestra el esqueleto estructural de una nave industrial prefabricada de hormigón situada en medio de la sierra madrileña. La obra se abandonó y desconozco los motivos. La imagen me parece escultórica; y algo onírica, a lo que sin duda contribuyen los toros que la circundan. Y antropomórfica, como dos manos en contacto por la punta de sus dedos.
Se trata de un sistema prefabricado eficiente y refinado, con un despiece pensado para su fácil transporte.
Por una parte están los soportes, figura 261, con una ménsula para servir de apoyo a las dos vigas centrales, también en fase de construcción. Una unión posterior en cabeza de soporte forma una unión rígida.
Por otra parte, las dos vigas centrales, figura 262, que no sólo tienen un acartelamiento a lo largo de su directriz sino que además se construyen con sección variable a lo largo de ella, con un ancho y canto creciente hacia el apoyo sobre los soportes. En su unión central forman, de hecho, una unión articulada.
Sobre ellas se colocan unas viguetas también prefabricadas y con sección aproximada de doble **T**.
Las zapatas probablemente sean también prefabricadas. No sé si habrá pretensado. La solución lo admite muy bien en soportes y viguetas, pero probablemente no es necesario y/o rentable en este caso.
Se trata de un diseño con mucho oficio. Son sistemas que compiten desde lo económico, y no desde el *diseño*. Pero, como ha pasado en innumerables ocasiones, pasar de una estructura bien diseñada a una buena obra suele ser sencillo. Al ver la estructura de forma aislada esto me resulta todavía más evidente.

Figura 264: Pórtico sobre autopista, Munich.
Portico over motorway, Munich.

Figura 265: Detalle del cordón superior.
Detail of the top boom.

Figura 266: Uniones en el extremo del cordón superior.
Joints at the edge of the top boom.

Pórtico sobre autopista en Munich

Figura 267: Unión en el extremo del cordón inferior.
Joints at the edge of the bottom boom.

Portico over a Munich motorway: bent steel plate engineering.

Figure 264 shows a metal portico constructed to hold signalling over a motorway in the Munich suburbs.
Although its booms are partially triangulated, only at the ends, it is designed so that more diagonals can be added if required.
The upper and lower booms are made of sheet metal that is shaped ad hoc, achieving the necessary inertia along both axes more by bending than its mass.
The upper one, which is under compression, figure 265, is thicker and has a larger bend to prevent problems with local warping.
The lower edges are perforated so that plates can be bolted on when required. I.e., this is a modular design that can be used in other cases. In fact, the upper boom has a connection with a joint cover.
The plates to hold uprights and diagonals are also perforated, so that on-site erection only requires bolting, figures 266 and 267.
This structure is very interesting, and it may well supply ideas for others.

Pórtico sobre autopista en Munich: ingeniería con chapa plegada.

La figura 264 muestra un pórtico metálico construido para colocar señalización sobre una autopista en las afueras de Munich.
Su triangulación entre cordones es parcial, solo en los extremos, pero está diseñado para poder añadir más diagonales si se necesita.
Los cordones superior e inferior se configuran con chapa conformada *ad hoc*, consiguiendo la inercia necesaria en ambos ejes, más con su plegado que con su masa. El superior, en compresión, figura 265, es más grueso y además tiene un plegado mayor para evitar problemas de pandeo local. Los bordes inferiores llevan perforaciones con separaciones regulares para poder atornillar chapones según cada caso. Es decir, se trata de un diseño modular que debe servir para distintas variaciones. De hecho, el cordón superior tiene un empalme con cubrejuntas.
Los chapones que reciben montantes y diagonales vienen también con los taladros para que el montaje en obra se realice solo con tornillería, figuras 266 y 267.
Es una estructura muy interesante. Bien podría dar ideas para otras de edificación.

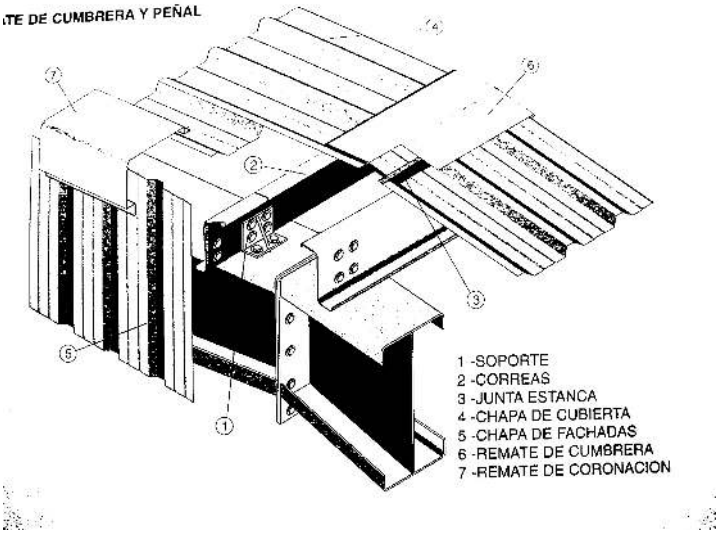


Figura 268: Sistema COMONOR para naves industriales.
COMONOR system for industrial buildings.

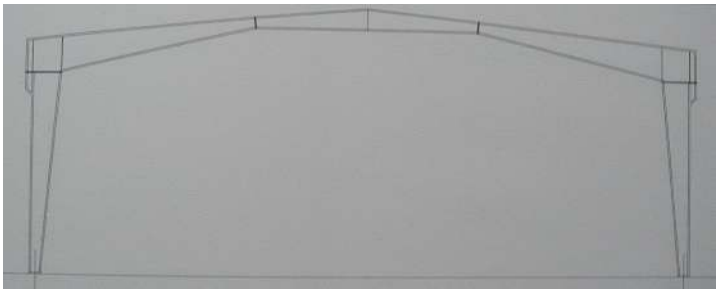


Figura 269: Pórtico tipo A-5 del sistema.
A-5 type portico of the system.

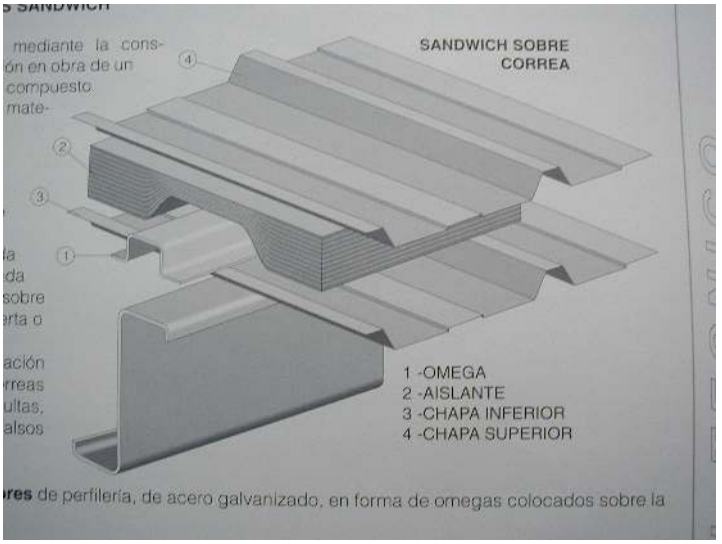


Figura 270: Agunas de las soluciones de cerramiento de cubierta y fachada.
Some solutions for covering the roof and facade.

Double T sections reinforced with bent plate booms:
Designed for rigidity.

The COMONOR company launched a steel portico design for industrial buildings that achieved a notable weight reduction, figures 268 and 269.
The key was to use reinforced sections in very thin plate.
Usually the design of porticos of this type calls for **IPE** sections, or worse, **HEB** sections. Corbelling is then usually added. But using sections of this type generally leads to over-size dimensions to achieve rigidity. **IPE** works well at lower slendernesses and higher loads. **HEB** has an even worse inertia/edge ratio.
It works well under flexion–compression when compression forces predominate, making it suitable for supports but not for beams.
The use of reinforced sections makes it possible to separate the wings at will, although this increases the consumption of the core. To reduce the mass the booms are shaped **C** sections. The bar can be corbelled too, improving its efficiency. The welding between the core, which is also plate, and the booms, is performed by robots and is not continuous.
After this the solution is more or less standard, with variations depending on the problem in question, figure 270. The purlins are **Z**–shaped sections designed especially for structures of this type: they have a high inertia to area ratio, and their shape adds inertia to both planes as they are installed at a slight slope. They are not thick so can be directly screwed onto the shaped section without welding. The facades also use sections and shaped panels with the same philosophy.
We tend to work with a lot of mental inertia. Sometimes existing solutions are improved very directly. But first the problem has to be recognised, and that is usually harder than resolving it.

Secciones doble T con cordones de chapa plegada: diseño a rigidez.

La empresa COMONOR lanzó un diseño de pórticos de acero para naves industriales que consiguió reducir notablemente su peso, figuras 268 y 269.
La clave está en utilizar perfiles armados pero con chapas de poco espesor.
Lo habitual, al diseñar este tipo de pórticos, es que se usaran perfiles **IPE**, o peor, perfiles **HEB**. Se suelen añadir acartelamientos. Pero el empleo de este tipo de perfiles deriva, por lo general, en un sobredimensionado para cumplir con la rigidez. El **IPE** funciona bien con esbelteces más bajas y cargas más altas. El **HEB** tiene una relación inercia/canto todavía peor. Funciona bien en flexocompresión cuando predominan las compresiones, lo que le hace adecuado para el soporte pero no para la viga.
El uso de perfiles armados permite separar las alas a voluntad, aunque también crece el consumo del alma. Para aligerar masa, los cordones son chapas conformadas en **C**. La barra, además, se puede acartelar, mejorando su eficacia. La soldadura entre el alma, también de chapa, y los cordones, se robotiza, y no es continua.
A partir de ahí la solución es más o menos estándar, con variantes según el problema, figura 270. Las correas son perfiles conformados en **Z**, especialmente diseñados para este tipo de estructuras: una relación de inercia y área alta, una forma que da inercia en dos planos al colocarse en ligera pendiente, pequeños espesores que permiten un atornillado directo de la chapa conformada, sin soldar. En las fachadas usan también perfiles y paneles conformados con la misma filosofía.
Solemos trabajar con mucha inercia mental. La mejora de soluciones existentes es, a veces, muy directa. Pero primero hay que reconocer el problema, eso es, en general, más difícil que resolverlo.

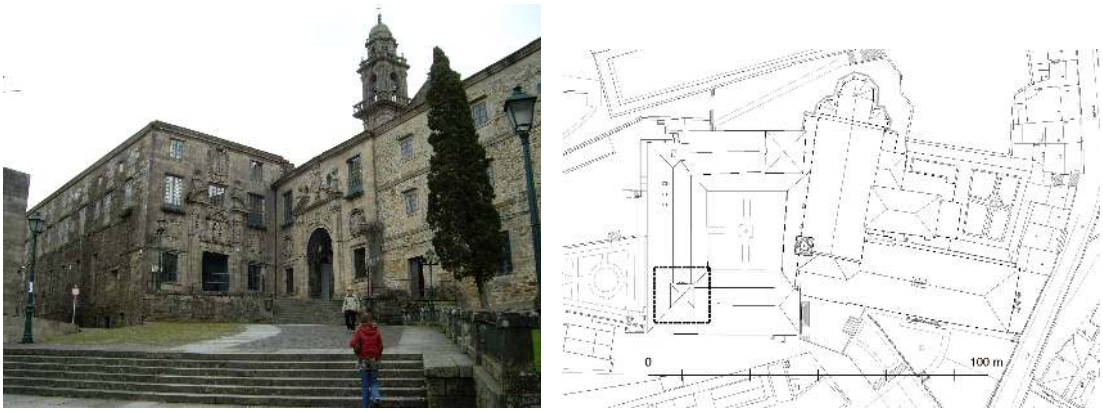


Figura 271: Monasterio de Santo Domingo de Bonaval. *Santo Domingo de Bonaval monastery.*

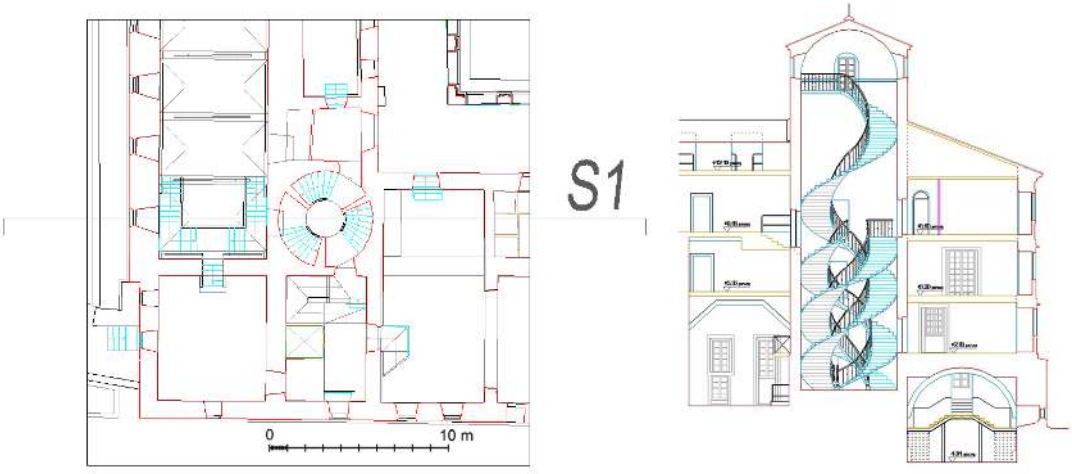


Figura 272: Situación de la escalera en el monasterio y sección. *Plan showing its location in the monastery and cross-section.*

Escalera helicoidal de Andrade

Andrade's helicoidal staircase: a structural exhibition in stone.

The triple helicoidal staircase known as Andrade's staircase, figures 271 to 273, is located in Santo Domingo de Bonaval Monastery, Santiago de Compostela; this building now contains the Museo do Pobo Galego.

This work is absolutely unique in the world. It did not form a part of the original monastery, and it was added during renovation work by the architect Domingos de Andrade (1639-1712) undertaken from 1693 to 1705. Andrade was an important local architect.

The staircase occupies a cylinder 5.64 m in diameter, and each step is 1.78 m wide; this therefore leaves a central open space 2.08 m in diameter. The staircase has three independent sections at 120°, figure 277, so that it connects to different levels. This means that you have to know which section to use to reach your destination.

The effect is spectacular, figures 273 and 274. It is made of granite, in a modular design, figure 275, in which each step is repeated, although there may be differences in the part of the step that is embedded. Note that the steps only connect in the central rib, which restricts the ways in which the structure can function.

How this structure behaves is unclear, and I believe that there are at least two options. The first and obvious option would be that each step functions as a projecting corbel, which would be very much compatible with an unsupported construction. However, this would require extremely strict quality control, something that would not have been easy with so many steps and the resources available at the time.

The second option would be that it is quasi–funicular, figure 276. The weight of each step in the central rib could be resisted by an axial force (F) along the said rib, plus another axial force (H) contained in the horizontal plane in a direction that varies along the height that would cause flexion-compression forces in each step.

La escalera helicoidal de Andrade: un exhibición estructural en fábrica de piedra

La tripe escalera helicoidal, llamada *escalera de Andrade*, figuras 271 a 273, está ubicada dentro del Monasterio de Santo Domingo de Bonaval, Santiago de Compostela, ahora dedicado al *Museo do Pobo Galego*.

No hay en todo el mundo una obra similar a esta.

No era parte de las trazas originales del monasterio, sino de una reforma posterior del arquitecto Domingos de Andrade (1639–1712) ejecutada entre 1693 y 1705. Andrade era un importante arquitecto de la zona.

La escalera se inscribe en un cilindro de 5,64 m de diámetro, con una anchura de peldaño de 1,78 m; dejando por tanto un espacio central de 2,08 m de diámetro. Tiene tres arranques independientes, a 120°, figura 277, lo que implica que sus desembarcos también son independientes, así que uno debe tener claro qué tramo tomar para llegar al destino correcto antes de empezar el ascenso.

El efecto es espectacular, figuras 273 y 274. Se construye en granito. El diseño es modular, figura 275, cada peldaño se repite, aunque puede haber diferencias en la parte incluida en el muro. Nótese que los peldaños solo tienen contacto en el nervio central, lo que limita las formas en que la estructura puede funcionar.

El comportamiento estructural no es claro. Desde mi punto de vista hay, al menos, dos opciones: La primera, obvia, sería que cada peldaño trabajase como una ménsula en voladizo. Eso es compatible con una construcción sin apeos. Pero que exigiría un control de calidad del material muy exigente, cosa nada sencilla con tantos peldaños y con los medios de la época. La segunda sería de tipo quasi–funicular, figura 276. El peso de cada peldaño en el nervio central se podría resistir con una fuerza axil (F) a lo largo de dicho nervio, más otro axil (H) contenido en el plano horizontal con una dirección que varía a lo largo de la altura, lo que produciría flexo-compresiones en cada peldaño.

Figura 273: Vista interior. *Interior view.*

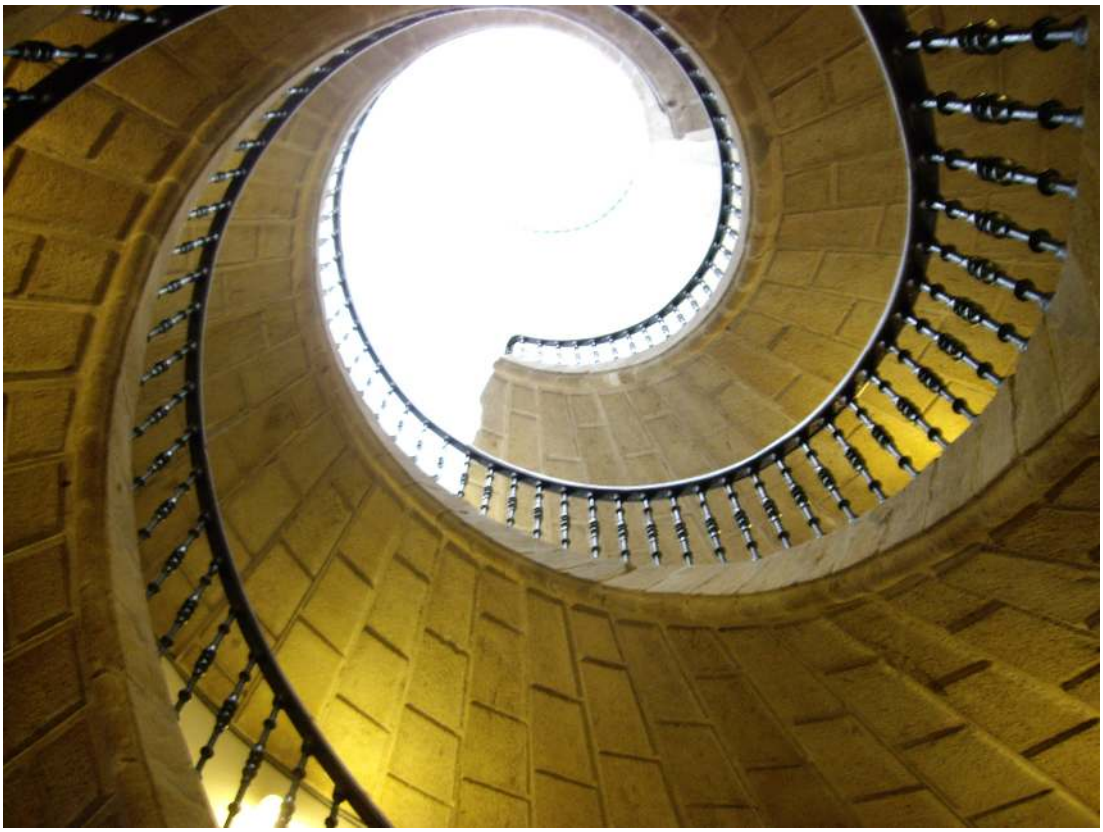


Figura 274: Vista interior. *Interior view.*

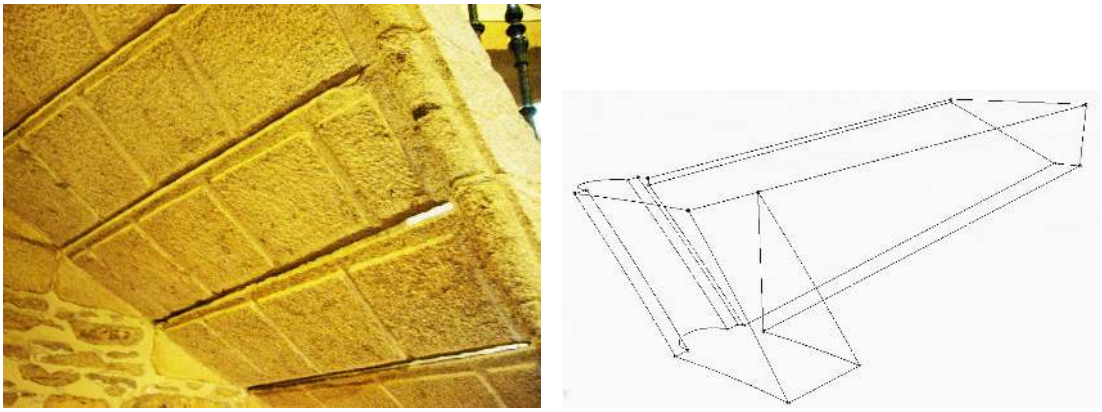


Figura 275: Detalle de los peldaños. *Detail of the steps.*

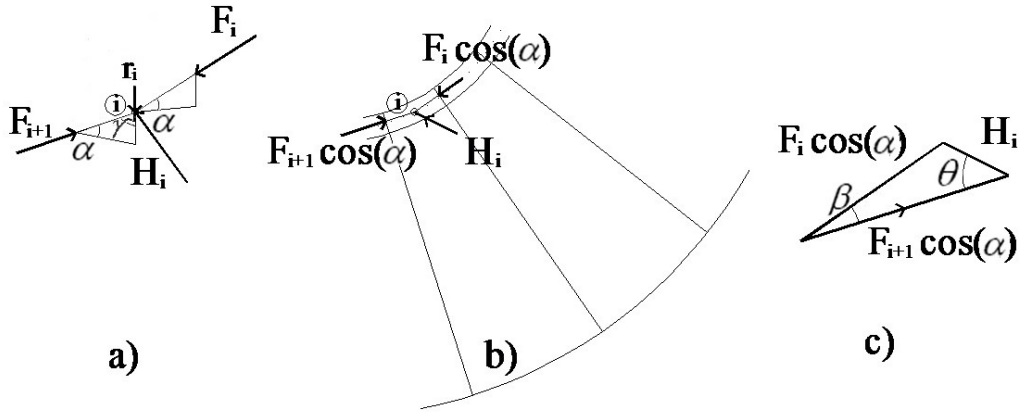


Figura 276: Esquema estructural quasi-funicular: (a) equilibrio de fuerzas en el nervio central, (b) y (c) equilibrio de fuerzas en el plano horizontal.
Quasi-funicular structural pattern: (a) balance of forces at the central rib, (b) and (c) balance of forces in the horizontal plane.

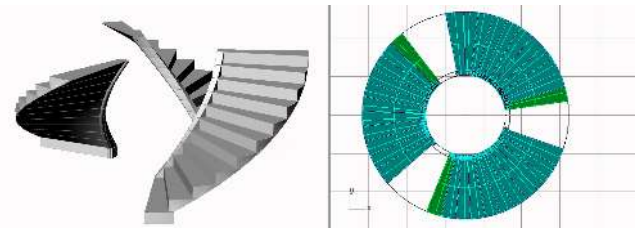


Figura 277: Arranque de la escalera de Andrade.
Start of the staircase.

Los esfuerzos son compatibles con la resistencia del granito, pero exigen, además, una capacidad de rasante en el contacto entre peldaños que el mero rozamiento podría no dar, lo que exigiría la existencia de algún tipo de conector. Faltan datos para confirmar esta hipótesis, pero es verosímil.
El primer esquema estructural, en voladizo, solo es compatible con la fase de construcción, llevándose todo el peso propio, que no es poco. Una vez rellena la junta del nervio central, esa hipótesis no es cinemáticamente posible. Cualquier tipo de sobrecarga debe ser, entonces, equilibrada con otro esquema.
El segundo esquema estructural es más autónomo, pero también requiere de un trabajo diferente en los primeros escalones de cabeza, antes de que el sistema quasi-funicular entre en juego.
Eso sin negar otras posibilidades, que no se me ocurren.
La escalera es una auténtica exhibición estructural, y una magnífica obra de arquitectura. Todavía hoy sería un objeto de exposición, cuanto más a finales del siglo XVII. Además de conocimientos, hay que tener mucho valor para firmar este proyecto con los medios técnicos de que se disponía. Hoy nos apoyamos fuertemente en el aparato científico, y así debe ser. Pero obras como esta demuestran que hay otras vías de conocimiento muy potentes. Cosa que, por otra parte, sabe cualquier diseñador con experiencia.
La estructura es generadora. Muchas obras han usado el alarde estructural como base de su diseño a lo largo de la historia. Al final, el éxito de ese enfoque depende de diversos factores, no solo de la estructura. No será la primera vez que una estructura, siendo un alarde, pase desapercibida. Como decía Eduardo Torroja, ninguna estructura pasará a la historia por sus cálculos. Aunque, como suele suceder, seguro que existe algún contraejemplo.

Although these forces are compatible with the strength of the granite, they would make it necessary for the steps to be joined by something stronger than simple friction, so that they would have to be interconnected by something. Although data are lacking that would confirm this hypothesis, it is credible.
The first structural pattern involving projecting steps is only compatible with the construction phase, when they would bear their own weight, which is not trivial. Once the joint in the central rib is filled, this hypothesis is kinetically impossible. Any type of overloading would therefore have to be resisted by another pattern.
Although the second structural pattern is more independent, it also needs the first steps at the top to be worked on in a different way before the quasi-funicular system comes into play.
I will not deny that there may be other possibilities that have not occurred to me.
This work is a true display of structure and a magnificent work of architecture. It is wonderful now, so how much more so it was at the end of the 17th century.
As well as expertise, bravery was needed to create this project, given the technical resources available at the time. Nowadays we base ourselves strongly on scientific apparatus, as we should. But works such as this one show that there other very powerful sources of knowledge, as any experienced designer will know.
The structure here is the source, just as many works throughout history have used structural display as the basis for their design. At the end of the day, the success of this approach depends on several factors other than the structure itself. A structure on display may go unnoticed.
As Eduardo Torroja said, no structure will become famous for the calculations it required. Nevertheless, as often happens, you can be sure that examples to the contrary exist.

Figura 278: Centro Cultural de Villanueva de la Cañada, nave principal. *Main building*

Centro Cultural Villanueva de la Cañada

Villanueva de la Cañada Cultural Centre: around the duality light+structure.

Villanueva de la Cañada Cultural Centre (1992-1997) is by the architect Juan Navarro Baldeweg.
As we said when describing Salamanca Conference Centre, (see page 119), Juan Navarro says that he has three recurring themes: gravity, light and the hand. Here in this work, light is handled more or less independently.
The structure of the main single-storey building has supports 15 m apart. This makes it highly flexible, something that is necessary in a building which can be used for a great many purposes.
Apart from that, the main structural decisions are based on other factors. According to the architect, the space in this building is like a square covered by an awning, where the light filters through from above. The way light is used is fundamental in the genesis of this work.
The 15 m span is crossed by **V**–shaped metal beams, figure 278, which run in rectangular skylights along the whole length of the building. The **V**-shaped beams are of a suitable width, as can be seen, which also goes well with the skylight construction.
Could a cheaper structure be used to cross the 15 m span? Of course it could. The sharp **V**–shaped top penalises the stresses in this zone.
It would be more efficient to use a structure with more area at both ends, such as **IPE** which is designed for flexion. But if there is a reasonably-sized edge, as is the case here, this penalty can be accepted. This is therefore a decision within the architectural project that is acceptable in structural terms.
This work is one of a series of projects in which Juan Navarro centres on skylight–beams, which I believe to be of enormous interest. One of these projects is the Salvador Allende Museum and Cultural Centre for Santiago de Chile (1993).
This duality (beams+skylight) is already a classic in the history of architecture. For example, we all remember the beams in the Hydrographic Studies Building in Madrid by Miguel Fisac, to mention an iconic example in Spain. It has to be said that, in general, Fisac centres far more on the structure than Navarro, although that would be another question.
Asymmetrical beams are often used, leading to torsion as well as the inevitable flexion. But when this is properly resolved it is not a serious problem, and an asymmetrical cross-section may be the most suitable one for a project. Many works have failed even though their structure is more than interesting, because they ignored light.

El Centro Cultural de Villanueva de la Cañada: en torno al binomio luz+estructura.

El Centro Cultural de Villanueva de la Cañada (1992–1997) es obra del arquitecto Juan Navarro Baldeweg.
Como se comentó al hablar del Palacio de Congresos de Salamanca, (véase la página 119), Navarro declara tener tres temas recurrentes: la *gravedad*, la *luz* y la *mano*. En esta obra se maneja la luz de forma más o menos autónoma. La estructura, en la nave principal, de una sola planta, tiene soportes a 15 m. Eso ofrece una gran flexibilidad, algo necesario en un edificio que puede albergar una gran diversidad de usos.
A partir de ahí, las decisiones estructurales principales están ya ligadas a otros factores. Según el autor, el espacio de la nave es como una plaza entoldada con la luz infiltrándose desde arriba. El manejo de la luz es fundamental en la génesis de esta obra.
Los 15 m de luz se salvan con vigas metálicas en **V**, figura 278, que se inscriben en unos lucernarios de sección rectangular y que recorren toda la longitud de la nave. Las vigas en **V** tienen un canto adecuado, como puede verse, que casa, además, con la formación del lucernario. ¿Se podría hacer una estructura más barata para esos 15 m? Obviamente. El agudo vértice de la **V** penaliza el estadio tensional de esa zona. Lo más eficaz es colocar más área en ambos extremos, como se hace, por ejemplo en el **IPE**, pensado para la flexión. Pero si el canto es razonable, como es el caso, se puede asumir esa penalización. Se trata, por tanto, de una decisión dentro del proyecto de arquitectura que es asumible desde la estructura.
Esta obra se encuadra dentro de una serie de trabajos de Juan Navarro en torno a vigas–lucernario y que, en mi opinión, tienen un enorme interés. Uno de estos proyectos es el Museo y Centro Cultural Salvador Allende para Santiago de Chile (1993).
El binomio (vigas+lucernario) es ya un clásico en la historia de la arquitectura. Todos recordamos, por ejemplo, las vigas de la Nave del Centro de Estudios Hidrográficos de Miguel Fisac, en Madrid, por citar un caso español emblemático. Hay que decir que, en general, Fisac se apoya mucho más en la estructura que Navarro. Pero eso sería otro debate.
En muchos casos se trata de vigas asimétricas, lo que induce una torsión, además de la inevitable flexión. Pero bien resuelto no se trata de un problema grave, y la sección asimétrica puede ser la más adecuada para el proyecto. Muchas obras han fracasado, con una estructura más que interesante, por olvidarse de la luz.

Figura 279: Pasarela Padre Arrupe. *Padre Arrupe footbridge.*

Pasarela Padre Arrupe

**Padre Arrupe footbridge:
Innovation using a consolidated type.**

The Padre Arrupe footbridge (1995-2000), figure 279, links the Abandoibarra quarter with Deusto University in Bilbao (close to the Guggenheim museum). It is by the IDEAM engineering company; the engineers were Francisco Millanes Mato, Javier Pascual Santos and Tomás Ripa Alonso, together with the architect Lorenzo Fernández-Ordóñez. They were helped by the engineer José Antonio Fernández Ordóñez.

This design was conditioned by its urban setting. Its elevation is discreet and elegant, and it fits very well into its surroundings. The pedestrian flow study eventually determined the basic shape of this footbridge, with a set of eight stairways and a strongly spatial configuration. Its layout is slightly off-centre from the riverbed, although the latter nevertheless influences the behaviour of the structure.

The basic idea is clearest in its vertical projection, figure 280, simplifying the actual **U**–shaped cross-section, figure 281, into a bar.

This gives rise to a classic type of beam with diagonal braces and anchorages at its ends which create an arch effect. This is necessary for the central span, although it does not cause thrust forces at the central supports (which take the form of vertical piling). I.e., although the thrust forces arise at the diagonal braces, they counterbalance each other.

The spatial pattern is therefore quite direct, figure 282. The diagonal braces open into a double lateral set over which the stairways are constructed. The central sections have to be braced to achieve equilibrium. Although this spatial form is not new, combining it with the stairways is, uniting functionality and good structural working.

The **U**–shaped cross-section of the footbridge, uniting the deck and handrails, creates a single strong shape, figure 281. The main component here is 20 mm thick stainless steel plate that forms the **U** and is visible on the exterior. 30 mm to 50 mm thick carbon steel boom plates are added under the wide handrail to reinforce the upper boom, forming a sheet.

High performance stainless steel is used, with a resistance to breakage due to traction of 600 Mpa.

**La pasarela Padre Arrupe:
innovación sobre un tipo consolidado**

La pasarela Padre Arrupe (1995–2000), figura 279, une el barrio de Abandoibarra con la Universidad de Deusto, en Bilbao (cerca del Museo Guggenheim). Es obra de la ingeniería IDEAM; de los ingenieros Francisco Millanes Mato, Javier Pascual Santos, Tomás Ripa Alonso y el arquitecto Lorenzo Fernández-Ordóñez. Contaron también con la colaboración del ingeniero José Antonio Fernández Ordóñez.

El contexto urbano ha condicionado el diseño. El alzado es discreto y elegante, y se integra de forma muy adecuada. El estudio del flujo peatonal acabó decantando la forma básica de la pasarela, con un juego de ocho escaleras y una fuerte configuración espacial. El trazado tiene un ligero esviaje con respecto al cauce que, no obstante, influye en el comportamiento de la estructura.

La idea básica se entiende mejor en su proyección vertical, figura 280, simplificándolo la sección real en **U**, figura 281, a una barra.

Aparece entonces un tipo clásico de viga con tornapuntas y anclajes extremos que consigue un efecto arco, necesario para la luz central, pero sin introducir empujes en los apoyos centrales (formalizados con un pilotaje vertical). Es decir, los empujes aparecen en las tornapuntas, pero se compensan entre sí.

El esquema espacial es, entonces, bastante directo, figura 282. Las tornapuntas se abren en un doble juego lateral sobre el que se forman las escaleras. Los arranques centrales se deben atirantar para cerrar el equilibrio. El esquema espacial no es nuevo, pero sí su integración con las escaleras, que combina funcionalidad y buen funcionamiento estructural.

La sección de la pasarela, en **U**, unifica tablero y barandillas, creando un único perfil resistente, figura 281.

El elemento principal es un chapón de acero inoxidable de 20 mm de espesor que forma la **U** y queda visto al exterior. Bajo el ancho pasamanos, reforzando el cordón superior, se añaden platabandas de 30 mm a 50 mm de grosor, de acero al carbono. Se forma, con ello, una lámina. El acero inoxidable es de altas prestaciones, con una resistencia de rotura a tracción de 600 Mpa.

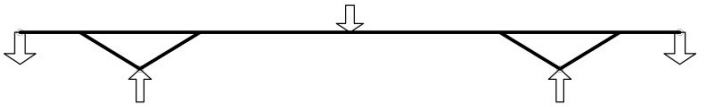


Figura 280: Esquema estructural en proyección vertical.
Structural form in elevation.

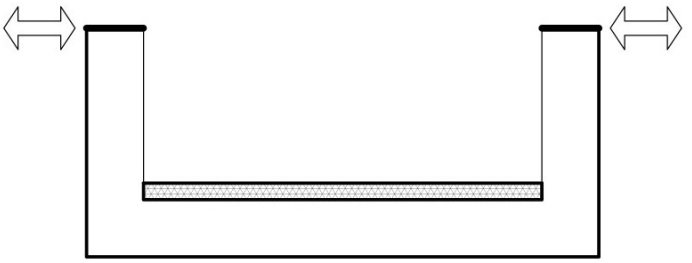


Figura 281: Esquema de la sección tipo.
Standard cross-section.

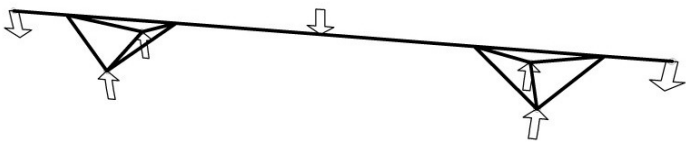


Figura 282: Esquema estructural espacial.
Spatial structural form.

Standard sections of sheet are stiffened transversally by sections every 3 m. 15 cm thick concrete slabs are placed over the horizontal part of the stiffeners with mixed connections, giving rise to a total thickness of 72 cm with the exterior steel plate, contributing notably to the good horizontal behaviour of the structure.

The stiffeners have three functions: they prevent localised bending of the sheet metal, they stop the upper boom from sagging in zones with a positive moment and they also work as beams in the horizontal section together with the concrete slabs and steel plate, creating a highly effective double–**T** slab. This is a more or less classical solution.

There are special stronger stiffeners in the areas where the stairways commence. They have to be able to resist the horizontal divergent forces caused by the change in the plane of the **U**. This point is structurally sophisticated and compromised, and it has been resolved without this being visible on the exterior.

The total length of the footbridge is 142.45 m, with a central span of 84 m. The edge of the **U** measures 1.95 m, giving a slenderness of 43 for the central section that fits with the continuity of the beam. The footbridge is a total of 7.60 m wide in its central span and 4.1 m in the stairways; this leaves an open width of 6.5 m and 3 m, respectively. The interior finish and handrail are in lapacho wood.

To prevent oscillation when people walk over the bridge, its dynamic behaviour was one of the main concerns during structural development. It was planned to install tuned mass dampers, although I do not know if they were finally fitted. For more information please see Millanes Mato, 2000.

It seems clear that there was a firm decision to include so many stairways in the design. Although it is true that they shorten the routes taken, in an urban setting this is not important. However, the inclusion of the stairways within the structural design gives rise to a significant new and beautiful solution.

I believe this to be a stupendous work in terms of how it fits into its urban setting as well as its design and structure. Its spatial form arising from its **U**–shaped structural cross-section creates problematic points where it changes direction, although this has been resolved in a way that is completely intrinsic to the structure itself. It is not odd for there to be zones under greater stress, as they are a part of the dialogue between form and structure. And the **U**–shape has given rise to other advantages.

The width of the walkways and the use of wood on the interior and the handrails are not minor details, as they strengthen the whole work, and I believe that this is also the case for the stainless steel finish on the rest of the footbridge.

La lámina, en su sección tipo, se rigidiza transversalmente con perfiles cada 3 m. Sobre la parte horizontal de los rigidizadores se apoya, con conexión mixta, una losa de hormigón de 15 cm, dando un canto total de 72 cm en conjunción con la lámina de acero exterior, y que contribuye notablemente al buen comportamiento horizontal de la estructura.

La función del rigidizador tipo es triple: evitar el abollamiento local de la lámina, evitar el pandeo del cordón superior en las zonas de momento positivo y funcionar como viga en el tramo horizontal en conjunción con la losa de hormigón y la lámina de acero, creando una losa de sección en doble **T** muy eficaz. Es una solución más o menos clásica.

En las zonas de ataque de las escaleras aparecen rigidizadores especiales, más potentes, que tienen que ser capaces de resistir las fuerzas desviadoras horizontales que provocan el cambio de plano de la **U**. Ese punto es estructuralmente sofisticado y comprometido, y ha sido resuelto sin que se note al exterior.

La longitud total es de 142,45 m, con un vano central de 84 m. El canto de la **U** es de 1,95 m, con una esbeltez para el tramo central de 43, que encaja con la continuidad de la viga. Los anchos totales de la pasarela son de 7,60 m en el vano central y 4,1 m en las escaleras; quedando un ancho libre de 6,5 m y 3 m, respectivamente. El acabado interior y el pasamanos es de madera de lapacho.

El comportamiento dinámico, para evitar el acoplamiento con el paso de personas, fue una de las mayores preocupaciones durante el desarrollo de la estructura. Se proyectó la colocación de amortiguación por masas sintonizadas, aunque no sé si finalmente se instaló. Para más información puede verse Millanes Mato, 2000.

Parece claro que hay también una fuerte voluntad formal en la decisión de introducir tantas escaleras. Es cierto que se acortan los recorridos, pero en un paso urbano eso no es significativo. Sin embargo, la integración de las escaleras en la forma estructural produce una solución novedosa y bella.

Creo que es una obra estupenda, tanto en su integración urbana como, particularmente, en el diseño y desarrollo de la estructura.

El esquema espacial, debido a la sección estructural en **U**, genera puntos problemáticos en los quiebros, pero su resolución ha quedado totalmente integrada. El que existan esas zonas más solicitadas no es algo raro, es parte del diálogo entre forma y estructura. Y la forma en **U** ha aportado otras ventajas.

La generosidad de los pasos y el uso de la madera al interior y en los pasamanos, fortalecen toda la obra, y también el acabado de acero inoxidable.

Figura 283: San Miguel de la Escalada, fachada principal. *San Miguel de la Escalada, main facade.*

Figura 284: Vista interior general, con el techo de la nave lateral, y la cubierta de la nave principal. *General interior view, with the ceiling of an aisle and the roof of the nave.*

San Miguel de la Escalada

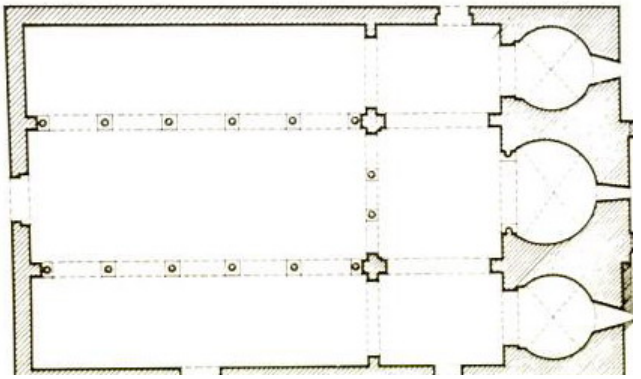


Figura 285: Planta de la iglesia.
Floor plan.

San Miguel de la Escalada:
masterly use of classical elements with Cordovan influence.

The church of San Miguel de la Escalada monastery (912-13) is a Mozarabic work dating from the resettlement. It was built in only one year by monks who had emigrated from Córdoba in the year 912. It stands on the remains of a Visigoth temple that had been destroyed by the Muslims in the 8th century. As was usual then, it contains remnants from this earlier work as well as other nearby ones. Its current state is the result of expansions and renovations of the original, as often happens.
The cross-section of the nave is clearly influenced by early Christian basilicas, and the two central walls are raised to offer lateral illumination, figures 283 and 284. Nevertheless, the floor plan is more hybrid, figure 285. The narthex is to one side, as is usual. More Mozarabic influence can be seen in the transept and sanctuary. The transept is separated from the central nave by a triple horseshoe arch, figurea 286. There is another triple horseshoe arch in the three apses of the sanctuary, topped by segmented domes, figures 285 ad 287. Although the roof frame is not the original one, in general it cannot differ very much from the latter. The nave has a span of about 5 m, while the span of the aisles is about 3 m, figure 284. The nave contains a classical frame of rafters on a continuous support and struts that hold the roof. A horizontal beam is visible at the sides, although the overhang indicates that there must be another one.

San Miguel de la Escalada:
uso maestro de elementos clásicos e influencia cordobesa.

La iglesia del monasterio de San Miguel de la Escalada (912-13) es una obra mozárabe, de repoblación.
La obra la construyeron, en solo un año, unos monjes que emigraron de Córdoba el año 912. Se asienta sobre los restos de un templo visigótico destruido por los musulmanes en el siglo VIII. Utiliza, como era habitual, restos de esa obra y otras cercanas. El estado actual es fruto de ampliaciones y reformas del original, como también suele pasar.
La sección de la nave tiene una clara influencia de las basílicas paleocristianas, con la elevación de los dos muros centrales para conseguir una iluminación lateral, figuras 283 y 284. Pero la planta es más híbrida, figura 285. El nártex pasa a un lateral, como es frecuente. En el transepto y la cabecera se aprecia más influencia mozárabe. El transepto aparece separado de la nave central por un triple arco de herradura, figura 286. Y en la cabecera se forma, en planta, otro triple arco de herradura con los tres ábsides, que se coronan con cúpulas gallonadas, figuras 285 y 287.
La armadura de cubierta no es la original, pero en sus trazas generales no debe diferir mucho de aquella. La nave central tiene unos 5 m de luz, y las laterales en torno a 3 m, figura 284. En la nave central se forma una clásica armadura de pares sobre un estribo corrido y tirantes, sobre los que está el cerramiento. En las laterales queda vista una viguería horizontal, pero debe existir otra en la dirección del faldón.

Figura 286: Arcos que separan transepto y naves. *Arches separating the nave and aisles from the transept.*

Figura 287: Ábside de la cabecera.
Sanctuary apse.

La división de las naves, por los arcos de herradura, junto con las cubiertas planas laterales, están relacionadas con la arquitectura de la Mezquita de Córdoba (véase la página 219). Hasta el muro de la cabecera con sus ábsides tiene algo de quibla y mihrab. El que sus constructores provengan de Córdoba no es algo casual. La Gran Mezquita de Córdoba concitaba la admiración tanto de musulmanes como de cristianos.

Es una obra que, por su interior, me causó una gran emoción. Había algo especial en ella, no sé muy bien por qué. Probablemente, una de las claves está en la iluminación de la nave central que, junto a la de los ábsides, crea un ambiente que es infrecuente en otras iglesias. El tratamiento de la cubierta y de los arcos que delimitan las naves, con una construcción impecable, son, seguro, otras de sus claves.

Para mí es una obra muy singular, y no lo es por el tipo de elementos que maneja sino por cómo se utilizan, aunque no tenga claras las claves de su éxito. Siempre es así. Igual que en pintura, en literatura...

Es necesario ver la obra en vivo. La foto es solo un buen aperitivo.

El papel de la estructura, en este tipo de construcciones clásicas, es siempre ambivalente, totalmente asociado a la construcción. Se usa para organizar el espacio. Y lo hace con total lógica constructiva y estructural. Pero, finalmente, en buenas obras como estas, trasciende el plano técnico.

El arco de herradura está asociado a la arquitectura musulmana. Su forma parecía vincularse solo al estilo. J. M. Ávila ha propuesto un origen constructivo más que verosímil, y a partir del cual podremos mirar esa forma de otra manera (Ávila Jalvo, 2014).

Es decir, nuestra mirada no es inocua. Lo que conocemos afecta a lo que vemos y a cómo lo vemos. Dibujar ayuda mucho a eliminar una parte de esos filtros.

The nave and aisles divided by horseshoe arches and the flat side roofs are linked to the architecture of Córdoba Mosque (see page ¡Error! Marcador no definido.). Even the sanctuary wall with its apses has something of the quibla and mihrab. The fact that its builders came from Córdoba influenced this work. The Great Mosque in Córdoba was admired by Christians as well as Muslims.

The interior of this work has a powerful effect on me. There is something special here, and I am not sure what it is. One reason may well be the illumination of the nave, which together with that of the apses creates an atmosphere not often found in other churches. The roof and arches between the nave and aisles, which are perfectly built, are surely other key factors.

The fact is that I find this to be a highly singular work. This is due not so much to the types of elements it contains as to how they are used, even though I am unsure why they are so successful. This is always the case, as it is in painting and literature ...

This work has to be seen in person, as photographs are no more than an aperitif. The role of structure in classical buildings of this type is always ambivalent and is totally unified with their construction. This is why it is used to organise the space inside, which it does with complete constructive and structural logic. But fine works such as these always eventually go beyond the technical plane. Horseshoe arches are associated with Muslim architecture, and their shape seems to be solely associated with this style. J. M. Ávila has suggested a very credible constructive reason for them, based on which we can see them in a new light (Ávila Jalvo, 2014).

That is, our gaze is not innocuous. What we know affects what we see and how we see it. Drawing helps a lot to overcome some of these filters.

Figura 288: Acueducto del Canal del Cornatel en Ponferrada. *Cornatel Canal aqueduct, Ponferrada.*

Figura 289: Arcos de apoyo. *Arches of the canal.*

Canal del Cornatel

Figura 290: Junta entre tramos.
Expansion joint.

Cornatel Canal aqueduct in Ponferrada: hydraulic engineering in urban areas.

Cornatel Canal carries water from Bárcena reservoir to the Lower Bierzo. It dates from the 1960s.
It is quite high up where it passes over the Boeza river in Ponferrada, so that it was decided to construct a siphon and thereby reduce the maximum height of all the aqueduct structure, figure 288. This seems to be a reasonable decision.
It has a highly interesting reinforced concrete structure: a funicular arch that varies in cross-section over which uprights or buttresses support the large tube of the siphon. The arches span about 20 m in case of flooding by the river Boeza, which has not been dammed. Each upright is duplicated to create a joint, figure 290. If these joints did not exist it would have been possible to reduce the cross-section of the arch using a Maillart-style design. I imagine that the joints are placed so close together to minimise fissures, as well as to simplify analysis, and why not? This decision was surely thoroughly thought out and reasoned.
The urban setting of this work consists of a hardly consolidated suburb, and the work does not amount to an attack on its surroundings. On the contrary, I believe that it is a pity that a walkway was not built along the top of the pipe, turning it into something even more useful for the city. This is of course a very noble work, and while there is a lot of industrial architecture in El Bierzo, it has to be said that it varies widely in quality. As well as the singular nature of this work, it is interesting for another reason too; if my information is correct, the engineer and writer Juan Benet was involved in it. His text on literary creation (Benet, 1999 (1966)) is of enormous interest for other creative fields, too, and even more so thanks to the fact that he was both an engineer and a writer.

Acueducto del Canal del Cornatel en Ponferrada: ingeniería hidráulica en áreas urbanas.

El Canal del Cornatel conduce una derivación de agua del Pantano de Bárcena hacia el Bierzo Bajo. Es una obra que data de los años 60. En su paso sobre el rio Boeza, en Ponferrada, discurre a una cota bastante alta, por lo que se ha optado por hacer un sifón y así reducir la cota máxima de toda la estructura del acueducto, figura 288. Parece una decisión razonable.
Su estructura, de hormigón armado, es muy interesante: un arco funicular se sección variable sobre el que arrancan machones o montantes que apoyan el gran tubo que forma el sifón. La luz de los arcos, de unos 20 m, es conveniente de cara a afrontar posibles crecidas del rio Boeza, que no está embalsado. Cada montante se duplica creando una junta, figura 290. De no existir estas juntas el tubo hubiese permitido reducir la sección del arco, con un planteamiento a lo Maillart. Imagino que la colocación de juntas a tan corta distancia está relacionado con el control de la fisuración; y por qué no decirlo, con la sencillez del análisis. Seguro que fue una decisión meditada y razonada. El contexto urbano es el de un barrio periférico poco consolidado. La obra no supone una agresión al entorno. Es más, personalmente, lo que me da pena es que no se hubiera construido una pasarela peatonal sobre el tubo, convirtiéndolo así en algo todavía más útil para la ciudad. La obra, desde luego, es muy noble. Y El Bierzo convive con mucha arquitectura industrial; aunque hay que decir que de muy distinta calidad.
Además de lo singular del acueducto, tiene otro interés adicional; si mi información no falla, el ingeniero y escritor Juan Benet estuvo involucrado en ella. Su texto referido a la creación literaria (Benet, 1999 (1966)) es una lectura de enorme interés para otros campos creativos; más aún por su doble condición de ingeniero y escritor.

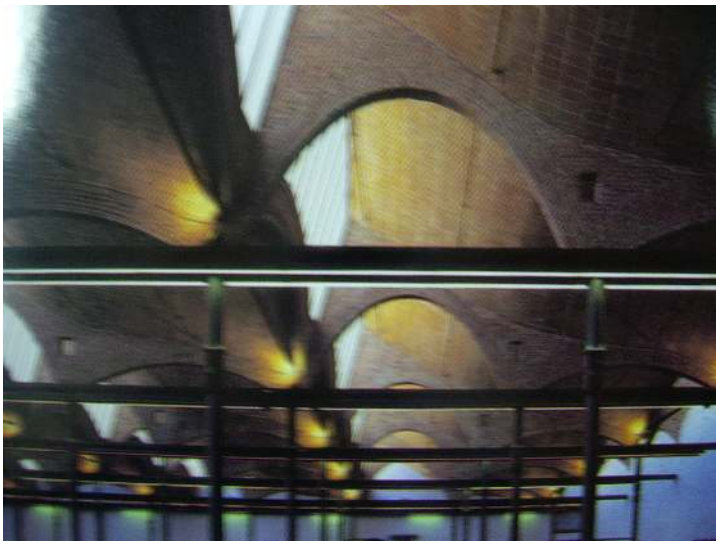


Figura 291: El Vapor Aymerich, nave principal.
Vapor Aymerich, main hall.

Figura 292: Módulo de la cubierta.
Roof module.

Vapor Aymerich

**Vapor Aymerich:
innovation within tradition.**

The Vapor Aymerich building (1907-08), figure 291, in Terrassa, was designed as a textile mill by the architect Lluis Muncunill. The architects Joan Margarit and Carles Buxadé renovated it so that it could house the Science and Technology Museum of Catalonia (1983).
It was called the vapor (steam power building) because this was how it generated its energy. The building was used by the initial company as well as by others, who were offered room and a connection to the energy.
Its cast iron supports form a grid measuring 4 m×8 m, in a highly flexible open-plan space lit from above. The roof is made of brickwork sometimes known as a Catalan or brick vault.
This technique has actually been used throughout the whole peninsula and not only for vaults. Many churches have false brickwork roofs in a range of shapes.
They are sometimes added to protect wooden roofs against fire.
This technique has most especially been used throughout eastern Spain. In Catalonia it was very commonly used in the industrial architecture of the 19th century and at the start of the 20th century.
The supports are joined at the top by steel beams in the short span of 4 m. Brick panels are constructed over these beams, in a double arch that rests on the supports ending in a corrugated sloping surface to create the skylights. The walled vaults rest on these arched walls, crossing the 8 m span and two modules deep, 2 m×4 m. Each module is braced at its ends and at three intermediate points, making it structurally independent. The main hall contains 8×23 modules; i.e., it measures 64 m×184 m, a notable size.
The walled system is ancient, and cast iron supports were already widely used.
The general pattern of this composition could not be more classical. However, the geometry of the walls and therefore the vaults is a total innovation, creating a work that is both spectacular and new. Structure here is at the heart of the project.

**El Vapor Aymerich:
innovación en la tradición.**

El llamado *Vapor Aymerich* (1907-08), figura 291, en Terrassa, se concibió como una fábrica textil. Es obra del arquitecto Lluis Muncunill. Los arquitectos Joan Margarit y Carles Buxadé rehabilitaron la obra para convertirla en el actual Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña (1983). Lo de *vapor* viene porque se generaba la energía a través de esa tecnología. El edificio sirvió a la empresa textil promotora, y luego también a otras, a las que ofrecía un espacio y la conexión a la energía.
Los soportes son de fundición, y forman una trama de 4 m × 8 m. Resulta un espacio diáfano de gran flexibilidad con iluminación cenital. La cubierta es una construcción tabicada, es decir, de ladrillo, llamada, a veces, bóveda catalana o bóveda tabicada. En realidad, se ha usado en toda la península y no solo para realizar bóvedas. Muchas iglesias tienen falsos techos tabicados, con formas dispares. A veces se trató de añadidos para la protección a fuego de la cubierta de madera. La técnica es especialmente empleada en todo el levante. En Cataluña se usará de forma habitual en la arquitectura industrial del XIX y comienzos del XX.
Los soportes se atan en cabeza, en la luz corta de 4 m, con vigas de acero. Sobre esas vigas se construyen unos diafragmas de fábrica de ladrillo, formando un doble arco para su apoyo puntual sobre los soportes, y con un remate ondulado y en pendiente para crear los lucernarios. Sobre esos muros en arco apoyan las bóvedas tabicadas, que salvan los 8 m de luz y tienen dos módulos de profundidad, 2 m × 4 m. Cada módulo está atirantado en sus extremos y en tres puntos intermedios, con lo que es estructuralmente autónomo. La nave principal tiene 8 × 23 módulos; es decir, 64 m × 184 m, unas dimensiones notables. El sistema tabicado era una tradición centenaria, y los soportes de fundición algo habitual. El esquema general compositivo no puede ser más clásico. Pero la forma de los muros diafragma, y con ello la de las bóvedas, es totalmente innovadora, creando una obra espectacular y novedosa. Y la estructura pertenece al corazón del proyecto.

Figura 293: Cubierta de chapa grecada de gran canto.
Broad edged corrugated sheet metal roof.

Figura 294: Detalle del apoyo extremo.
Detail of the edge support.

Figura 295: Tirantes entre los extremos y la clave.
Braces added between the ends and the crown.

Pabellón cubierto

Broad edged corrugated sheet metal: new possibilities to explore.

Figure 293 shows a covered pavilion for municipal use in Vicálvaro, Madrid.
I do not know whether to call this a work of architecture or an emergency building. It is clear that it is made with the aim of achieving maximum saving, or at the least that is what it looks like.
Broad edged corrugated sheet metal, figure 294, has sufficient inertia to cover this space in a span of some 12 m, forming a vault without any other structural elements, or almost none.
The vault is braced by cables, figure 295. Additionally, due to the low weight of the sheet metal another set of braces is added between the ends and the crown, improving its behaviour in wind. At first sight you would say that the main problem faced by the design of this structure is exactly its wind resistance.
Sheet metal like this has been in use for some time in agricultural buildings, and more recently it has come into use in other more architectural areas. I believe that it is an interesting structural and constructive element, which when it is used properly it is compatible with quality architecture.
Why not? We have seen how bent sheet metal was used masterfully by Philippe Samyn and Partners in the new roof over Leuven railway station (see page 201) and that is not unique.
Although it is clear that not all materials and constructive elements are of equal quality as a finish, and that nor do they offer the same features, I do not believe that it is possible to simply talk about second-class materials and elements, as it is solely a question of the degree to which they are suitable for each problem.

La chapa grecada de gran canto: nuevas posibilidades por explorar.

La figura 293 muestra un pabellón cubierto de uso municipal en Vicálvaro, Madrid.
No sé si llamarlo obra de arquitectura o construcción de emergencia. Parece claro que está realizado con un criterio de máximo ahorro.
La chapa grecada de gran canto, figura 294, ofrece inercia suficiente como para cubrir ese espacio, de unos 12 m, formando una bóveda, sin otros elementos estructurales. O casi.
La bóveda se atiranta por cables, figura 295. Además, debido al poco peso de la chapa, se añade otro juego de tirantes entre arranques y clave, lo que favorece el comportamiento a viento. A simple vista, se diría que el mayor problema que debe encarar el diseño de esta estructura es, justamente, la resistencia a viento.
Este tipo de chapas se usan hace tiempo para construcciones agrícolas y desde hace algunos años se están comenzando a ver en otros ámbitos más cercanos a la arquitectura. Creo que es un elemento constructivo y estructural interesante y que, bien manejado, es compatible con una arquitectura de calidad.
¿Por qué no? Ya hemos visto cómo la chapa plegada de pequeña onda ha sido manejada de forma magistral por Philippe Samyn and Partners en la nueva cubierta de la Estación de Ferrocarril de Leuven (véase la página 201). Y ese no es un caso único.
Aunque es obvio que no todos los materiales y elementos constructivos tienen la misma calidad como acabado, ni las mismas prestaciones, no creo que se pueda hablar, sin más matices, de materiales y elementos de segunda clase. Es solo una cuestión de adecuación a cada problema.

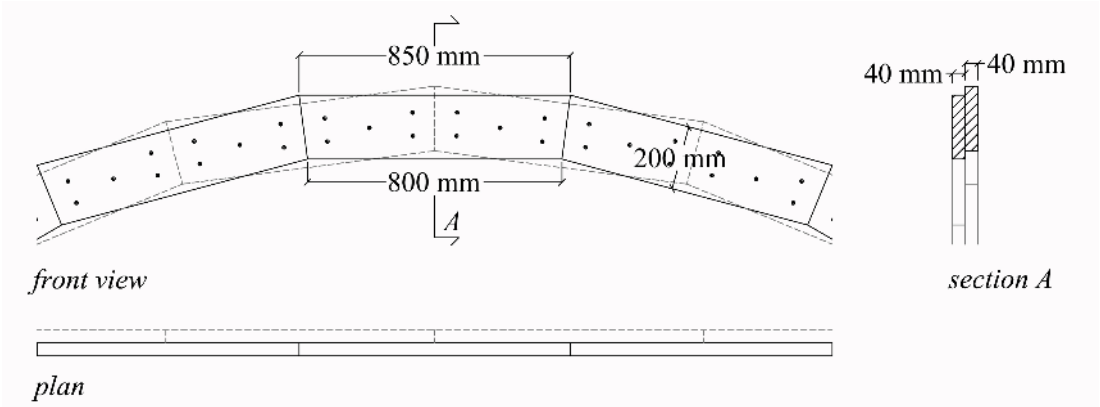


Figura 296: Unión tipo de camones. *Standart union.*

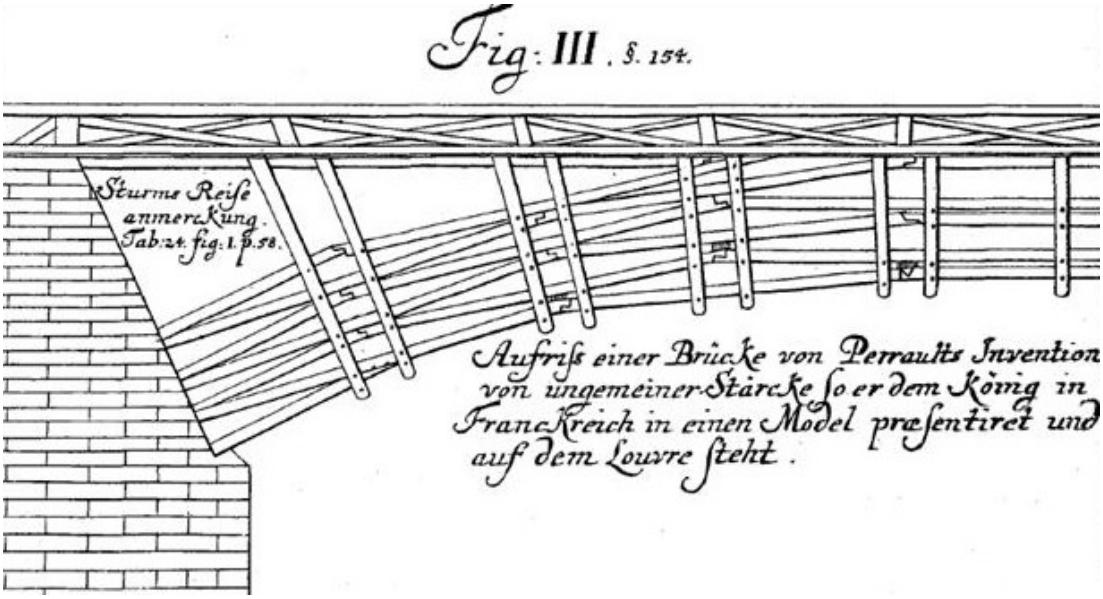


Figura 297: Puente diseñado por Perrault, Paris. *Bridge designed by Perrault, Paris.*

El arco encamonado

**Wooden framed arches:
Diversity and the evolution of a technique.**

This section will describe a good number of works that use the wooden framed arch technique and its derivatives.
This will make it possible to see how a constructive technique adapts to different architectural intentions as well as how it evolves, and as it evolves how it leads to new proposals, even today.
Wooden framed arches arose as a response to the limitations of sawn wood in meeting the needs and fulfilling the design intentions of architectural and engineering projects.
Sawn wood is restricted by the size of its cross–section, the lengths that are available and the shape of pieces, which are usually straight.[a].
How can these limitations be overcome? Several strategies exist, depending on the type of limitation in question, although eventually each solution usually resolves several problems simultaneously.
The simplest way to increase length is by overlapping then tying, figure 298 shows the mast of a ship that uses this technique. Although it is a rarity[b], it illustrates this solution very well. With only two pieces, this design aims above all to achieve resistance against flexion rather than against axial forces.
This idea is the basis of the wooden framed arch, joining short pieces known as frames by overlapping them, figure 296. But as each layer is complete, i.e., as there is a fully butted joint at the ends, axial forces are transmitted better. It has to be said that resistance against flexion is not especially good. Each butted joint involves breaking the continuity against flexion, which is partially recovered by using nails (for more details see for example Fernández-Cabo et al., 2015).
We can find alternative forms of this idea, such as the arched bridge proposed by Perrault for Paris in 1688, figure 297.

[a] Some solutions in traditional carpintery deliberately make use of the curved parts of tree trunks to help form arch structures. But apart from these rare examples, traditional carpintery only uses straight pieces.

[b] This photograph was taken in 2005 at the Cornish coast, United Kingdom.

**El arco encamonado:
diversidad y evolución de una técnica.**

En este apartado se van a describir un buen número de obras que utilizan la técnica del arco encamonado de madera y sus derivaciones. Esto permitirá descubrir cómo una técnica constructiva se va adaptando a diferentes intenciones arquitectónicas y, además, cómo evoluciona y, al evolucionar, deriva en nuevas propuestas, incluso hoy día.
El arco encamonado nace como respuesta a las limitaciones de la madera aserrada para responder a las necesidades y, no en menor medida, a las intenciones formales del proyecto de arquitectura e ingeniería.
La madera aserrada está limitada por el tamaño de escuadría, por las longitudes disponibles y por la forma de las piezas, que son rectas en general[a].
¿Cómo vencer esas limitaciones? Hay varias estrategias, dependiendo del tipo de inconveniente, aunque al final cada solución suele resolver varios problemas a la vez.
La forma más elemental de aumentar la longitud es hacer un solape y posterior atado. La figura 298 muestra el mástil de un barco que usa esta técnica. Es una rareza[b] pero pone de manifiesto muy bien esta solución. Con sólo dos piezas, el diseño se orienta sobre todo a la resistencia a flexión más que al axil.
La idea del arco encamonado es la misma, la unión por solape de piezas cortas llamadas camones, figura 296. Pero al tener roscas enteras, es decir, también con una unión a tope en las testas, la transmisión del axil se mejora. Hay que decir que la resistencia a flexión no es especialmente buena. Cada unión en testa supone romper la continuidad a flexión, que se recupera en parte con el auxilio de clavijas, pero solo de forma parcial (para más detalles véase por ejemplo Fernández-Cabo y col., 2015).
Esta idea se puede encontrar con formas alternativas, en el puente en arco propuesto por Perrault para Paris en 1688, figura 297.

[a] Hay soluciones de la carpintería tradicional que usan deliberadamente partes curvas del tronco para ayudar en la formación de estructuras tipo arco. Pero dejando aparte esa rareza, la carpintería tradicional sólo dispone y usa piezas rectas.

[b] La foto fue hecha en 2005 en la costa de Cornualles, Reino Unido.

Figura 298: Enlace por solape de un mástil de un barco.
Overlapping join in a ship's mast.

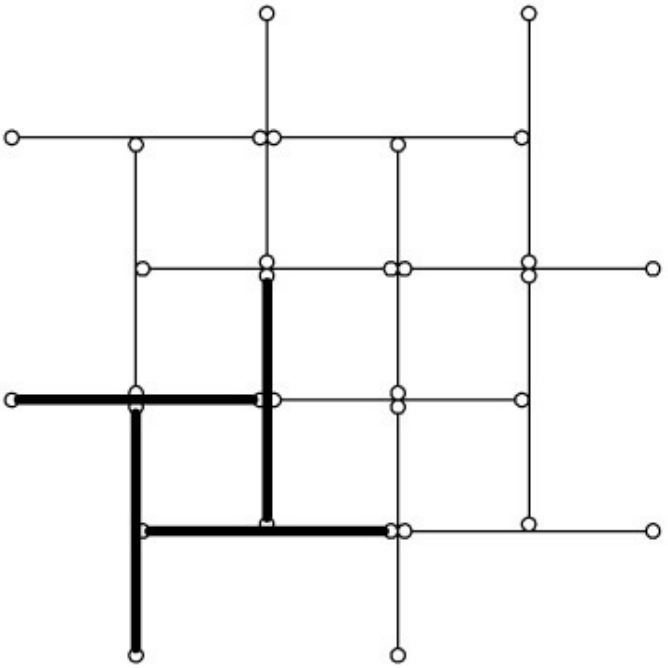


Figura 299: Esquema estructural del forjado descrito en el tratado de Serlio.
Structural scheme for the floor by Serlio.

El arco es una excelente forma estructural, pero su ejecución con madera aserrada no es sencilla. La propuesta de Perrault es muy ingeniosa, aunque, desde luego, era una vía con corto recorrido. La línea más usada, antes de la invención de las colas, fue la de formar un arco laminado doblando cada pieza, con la ayuda de calor y mucha humedad, y uniéndolas con clavijas o bridas metálicas. Cuando aparecen las colas para madera, en el siglo XIX, su uso para hacer arcos de madera laminada era un paso natural y necesario. La utilización sistemática se produce a comienzos del siglo XX (véanse las páginas 309 y 293). Pero sin las colas, la unión de pequeños camones fue una solución para formar arcos, y aunque su eficiencia sea mejorable, resolvieron el problema durante siglos; a veces en condiciones de carga severas, como veremos.
El origen del arco encamonado es incierto. Probablemente derive de las cimbras de madera usadas para la construcción de los arcos de fábrica desde, al menos, la época romana.
La misma idea aparece también en el plano horizontal, en forjados, asociados por tanto a un problema de flexión. Era, de nuevo, una forma de superar la limitación que suponía la longitud de las escuadrías aserradas; o en otras ocasiones, para aprovechar las más cortas. Y, por supuesto, su uso también está vinculado a una exploración formal. El conocido manual de arquitectura de Sebastiano Serlio, *I Sette libri dell'architettura*, publicado entre 1537 y 1551, contenía una ilustración de un entramado de piso realizado con una estructura recíproca de cuatro barras ortogonales, figura 299. Pero el invento pudo ser muy anterior.
Hay, incluso, realizaciones en fábrica de piedra, para pequeños forjados planos, que siguen estas mismas trazas; aunque son una rareza.
En Europa, su utilización tiene un nuevo impulso desde 1567, gracias a las propuestas del arquitecto francés Philibert De L'Orme. De L'Orme trabajaba sobre todo con fábrica de piedra, no con madera, lo que apoyaría la hipótesis de que el arco encamonado tiene su origen en la cimbra.

Although the arch is an excellent structural form, it is not simple to make one using sawn wood. Perrault's proposal is highly ingenious, even though it is for a short distance. Before the invention of adhesives, the most widely used approach was to create a laminated arch by bending each piece with the help of heat and very high humidity before joining them using nails or metal clamps.
When adhesives for wood appeared in the 19th century they were naturally and necessarily used to make wooden framed arches. They came into systematic use at the start of the 20th century (see pages 309 and 293). But even without adhesives, joining short pieces of wood was a means of forming arches, and even though their efficiency could be improved they solved the problem during centuries, sometimes under severe loads, as we will see.
The origin of wood framed arches is unknown. They probably derive from the wooden frames used to construct stone arches from at least Roman times.
The same idea arose in the horizontal plane for floors, associated with a problem with flexion. Once again, it was a means of resolving the problem of the limitation in the length of sawn wooden pieces; or, at other times, it was a way of making use of the shortest pieces.
It was of course also a means of exploring its design possibilities. The well-known architectural manual by Sebastiano Serlio, *I Sette libri dell'architettura*, that was published between 1537 and 1551, contains an illustration of a flooring grid with a reciprocal structure of four orthogonal bars, figure 299. However, this may have been invented a very long time beforehand.
There are even some examples in small flat stonework surfaces that are along the same lines, although they are rare.
In Europe their use was encouraged by the proposal of the French architect Philibert De L'Orme after 1567. De L'Orme worked with stone above all rather than wood, which would support the hypothesis that wooden framed arches originated in falsework.

Figura 300: Iglesia de Torija, España. *Torija parish church, Spain.*

Figura 301: Iglesia de Mocejón, España. *Mocejón parish church, Spain.*

Figura 302: Iglesia de Mocejón, España. *Mocejón parish church, Spain.*

De L'Orme's new idea was actually to propose the system for creating first order supporting structures using vaulted and domed forms. This system became popular, most especially in France and Germany, where it was used well into the 19th century for roofs as well as small bridges. However, trials in the 19th century showed that this system was not very robust, as the large number of joints strongly restricted the total cross-section of arches. But what finally finished off this system was the emergence of new materials and wood adhesives.

The system gradually fell into disuse, although some examples have survived from the start of the 20th century. And even now some proposals use it, although this is due more to design reasons than any technical question.

Those who built using this system were fully aware that it is not very strong. Thus in Europe on the majority of occasions when they were used, wooden framed arches appear in secondary structures that simply support a false ceiling in bamboo and plaster. We will examine several examples of these systems.

Figura 300 shows an example of use in the parish church of Torija, Guadalajara, Spain. Inside the vault the arch hangs from oversize struts and side timbers.

The vault is independent in the transept, and it leaves the apeinazada collarbeam upper roof visible, showing that the wooden framed structure is an addition, surely made during the baroque period.

Mocejón parish church, in the province of Toledo, contains a similar example, figures 301 and 302. This is how the technique is usually used in Spain, and this is also the case in Italy.

Even in Germany, which is where De L'Orme's ideas had the greatest success, this approach is often used in secondary structures. One example of this is in St. Gallus church (1734-38) in Kisslegg, Bavaria, figure 303.

In Latin America the Spanish used this type of structure along the lines suggested by De L'Orme as a first order structure, most especially in the 17th and 18th centuries (see Hurtado Valdez, 2012), and usually with a better designed joint. This original reason for this was strictly technical, as it reduced weight.

Stone buildings in America were heavily damaged by the first earthquakes they suffered. Some suggestions were made to use volcanic stone to reduce weight, but wood seemed to be more reasonable and was therefore used.

A good number of works in wood are in areas such as the coast of Peru where wood had to be imported. There are still many works which date from this time.

La novedad de De L'Orme, en realidad, es proponer el sistema para crear estructuras portantes de primer orden con formas abovedadas y cupuliformes. Y la idea cuajó sobre todo en Francia y Alemania, en donde se empleó hasta bien entrado el siglo XIX, tanto en cubiertas como, incluso, en pequeños puentes. Los ensayos hechos en el XIX mostraban que el sistema no era muy rígido. Como se decía, el gran número de uniones penalizaba mucho la sección bruta del arco. Pero lo que realmente acabó con él fue la aparición de los nuevos materiales y de las colas. El sistema irá muriendo poco a poco, aunque todavía quedan ejemplos de principios del XX que han llegado a nuestros días; y aún hoy existen propuestas que lo usan, aunque más por cuestiones formales que técnicas.

Que el sistema no era rígido era bien conocido por el que lo construía. Y así, en Europa, en la mayoría de las ocasiones, el arco encamonado aparece asociado a estructuras secundarias que solo resisten el falso techo de cañizo y escayola. Veamos varios ejemplos de esos sistemas.

La figura 300 muestra su empleo en la Iglesia parroquial de Torija, Guadalajara, España. En la bóveda, el arco cuelga de unos tirantes sobredimensionados con el auxilio de correas. En el crucero, la bóveda es autónoma, y deja ver una sobrecubierta de par y nudillo apeinazada, lo que demuestra que la estructura encamonada es un añadido, seguramente del barroco.

La iglesia parroquial de Mocejón, en la provincia de Toledo, es otro ejemplo similar, figuras 301 y 302. Y este es el enfoque mayoritario presente en España. En Italia sucede lo mismo.

Incluso en Alemania, que es en donde las ideas de De L'Orme tuvieron más éxito, es más frecuente el enfoque como estructura secundaria. Un ejemplo es la iglesia de St. Gallus (1734–38) en Kisslegg, Baviera, figura 303.

En América Latina, los españoles reproducen el tipo siguiendo a De L'Orme, como estructura de primer orden, sobre todo entre los siglos XVII y XVIII (véase Hurtado Valdez, 2012), y con una unión, en general, mejor diseñada. Y la razón original era estrictamente técnica: la reducción del peso.

Ante los primeros grandes sismos, las obras de fábrica sufrieron mucho. Hubo algunas propuestas que emplearon piedra volcánica para reducir peso, pero el uso de la madera parecía la vía más razonable. Y así fue. De hecho, un buen número de ellas aparecen en zonas, como en la costa de Perú, en donde la madera debía ser importada. Todavía queda un importante patrimonio de esa época.

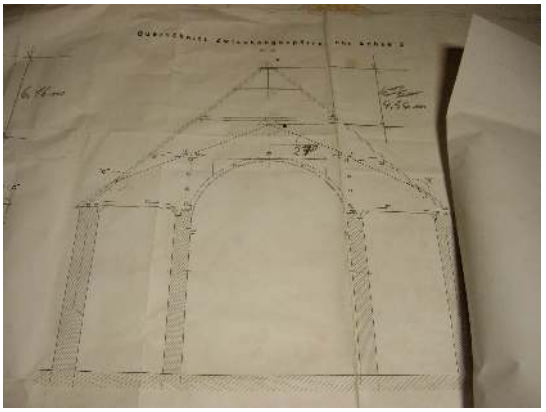
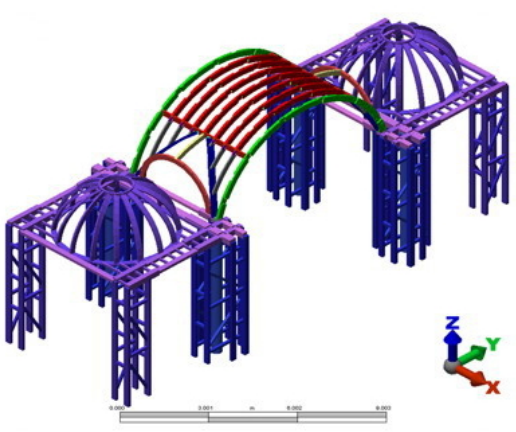


Figura 303: Iglesia de St. Gallus, Alemania. *St. Gallus church, Germany.*

Figura 304: Catedral de Ica, Perú. *Ica Cathedral, Peru.*



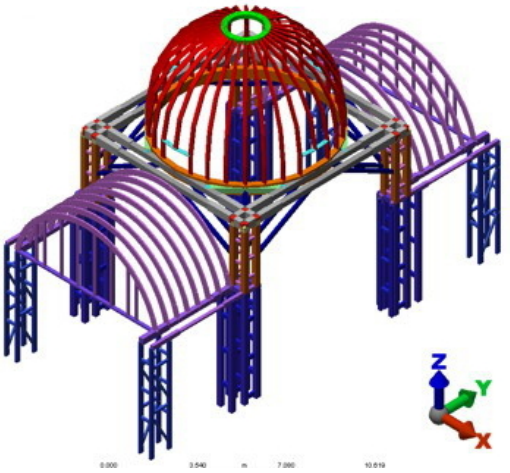


Figura 305: Esquemas estructurales de la catedral de Ica. *Structural forms in Ica Cathedral.*

Ica Cathedral in Peru (1759) is an example of this practice, figures 304 and 305. It was damaged in the Pisco 2007 earthquake (see Fonseca Ferreira et al., 2015).
The arch is used to support vaults and domes, and large openings were added, even though structurally this was not done very cleanly.
In low rainfall areas the roof is constructed directly over these wooden framed arches using reeds and mud. Unsurprisingly the same has been done in the driest areas of Spain, and one example of this is Seville Cathedral.
This technique continued to be used throughout the 19th century and it was even used, although to a far lesser extent, at the start of the 20th century.
An interesting example is the textile industry Nave de blanqueo (Whitening building) that was built in 1875 in Mataró by the young Antoni Gaudí, figure 306.
The current building is a reconstruction and remodelling dating from 2010. It has a span of 11 m, and the arches are 4.1 m apart. Their cross-section is composed of three wooden pieces with 220 mm edges, 70 mm thick on their external face and 95 mm thick at the centre, with a maximum length of 1.5 m. This arch is a long way from being anti-funicular.
Another example of late usage is found in Copenhagen Central Station hall, figures 307 and 309, which was built in 1911. It uses *Ardant* trusses spanning about 20 m as its main structure. The concave arch is wooden framed.
Nor should we forget that the arches of the glazed vaults of the Crystal Palace, 1850, which spanned 21.9 m, were made using semicircular framed arches (see page 205).
Distortion of an orthogonal pattern into an oblique one, a more than logical step, led to the patent of Friedrich Zollinger in 1921 known as the *Zollinger system*, figure 310. This improved performance along its plane under axial load, while maintaining resistance against flexion. It was directly used in vaulted spaces.
It was enormously successful in Germany during the 1920s, most especially in Bavaria (see for example Bairstow, 2003).
Use of this system spread to the Scandinavian countries, such as the riding school in the outskirts of Copenhagen. This used spans of some 20 m, and it is shown in figure 312.
Zollinger's idea was translated from wood to steel by the proposals of Hugo Junkers (see page 241).

Un ejemplo de esa práctica es la Catedral de Ica (1759), Perú, figuras 304 y 305, dañada en el sismo de Pisco de 2007 (véase Fonseca Ferreira y col., 2015).
El arco se utiliza para sostener bóvedas y cúpulas que, además, añaden grandes lunetos, aunque de una forma que no es estructuralmente muy limpia. Cuando la pluviometría es baja, el cerramiento se forma directamente sobre esos arcos encamonados, con cañizo y barro. No es de extrañar, algo similar se ha hecho también en zonas más secas de España, por ejemplo en la Catedral de Sevilla.
Como se decía, la técnica todavía pervive a la largo del XIX e incluso, aunque en mucho menor medida, a comienzos del XX.
Un curioso ejemplo es la *Nave de blanqueo*, de la industria textil, construida en 1875 en Mataró por un joven Antoni Gaudí, figura 306. La obra actual es una reconstrucción y remodelación de 2010. La luz es de 11 m, y cada arco está a 4,1 m. Su sección se compone de tres camones de 220 mm de canto, cuyo grosor es de 70 mm en la cara externa y de 95 mm en la parte central, con una longitud máxima de 1,5 m. El arco está muy lejos de ser antifunicular.
Otro ejemplo de su empleo tardío se encuentra en el hall de la Estación Central de Copenhague, figuras 307 y 309. Construido en 1911, tiene como estructura principal unas cerchas tipo *Ardant* de unos 20 m de luz. El arco del intradós es un arco encamonado.
Y no olvidemos que los arcos de las bóvedas acristaladas del Crystal Palace, de 1850, con 21,9 m de luz, se construyeron con arcos encamonados de trazado semicircular (véase la página 205).
La distorsión de la trama ortogonal a una oblicua, un paso lógico, da lugar a la patente de Friedrich Zollinger en 1921, conocido como *sistema Zollinger*, figura 310, que mejoraba el comportamiento a carga axil en su plano, manteniendo al mismo tiempo una resistencia a flexión. Su uso en espacios abovedados era inmediato.
Su éxito en la Alemania de los años 20 fue enorme, en especial en Baviera (véase por ejemplo Bairstow, 2003). Su expansión llegó también a los países nórdicos, como por ejemplo el picadero a las afueras de Copenhague, de unos 20 m de luz, mostrado en la figura 312.
La idea de Zollinger pasó de la madera al acero con las propuestas de Hugo Junkers (véase la página 241).

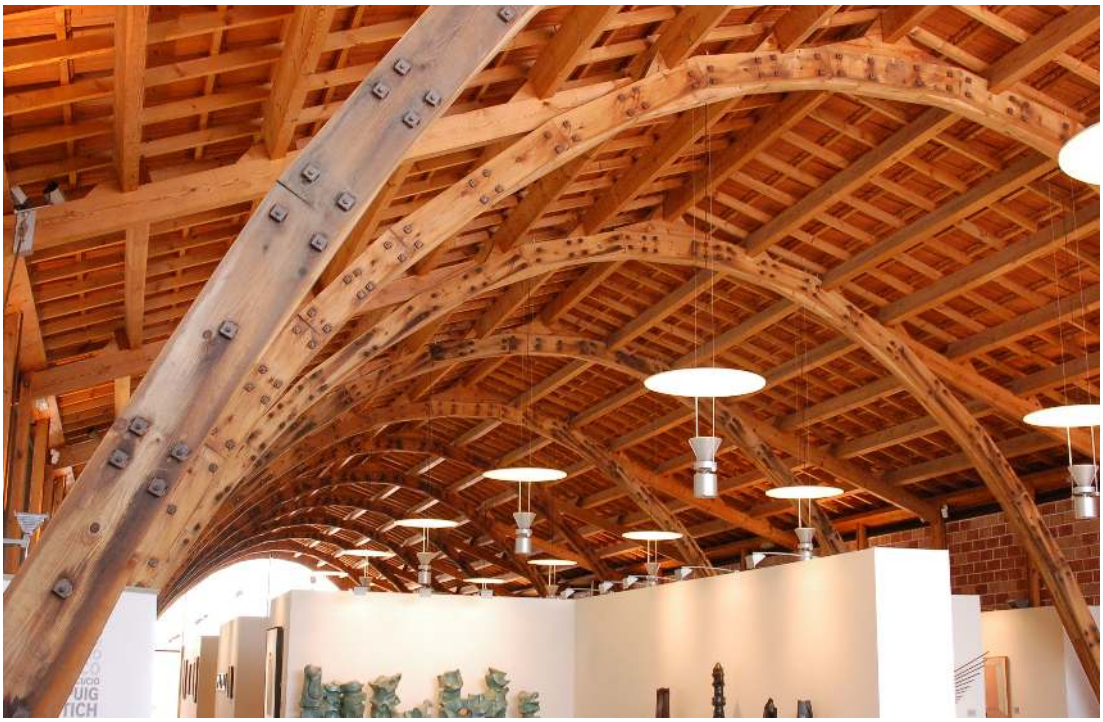


Figura 306: La *Nave de blanqueo*, España. *The Nave de Blanqueo.*

Figura 307: Hall de la Estación central de Copenhague. *Copenhagen Central Station hall.*

Figura 308: Estructura tipo *Ardant* del Hall de la Estación central de Copenhague.
Ardant *truss structure in Copenhagen Central Station hall.*

Figura 309: Estructura tipo *Ardant* del Hall de la Estación central de Copenhague.
Ardant *truss structure in Copenhagen Central Station hall.*

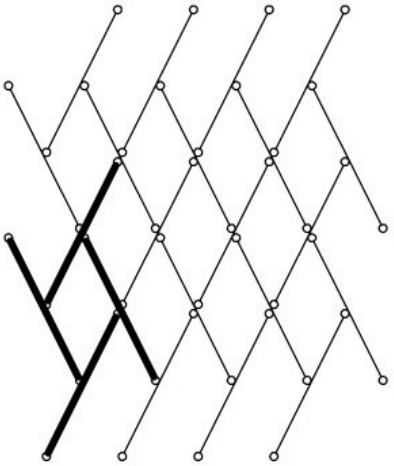


Figura 310: Esquema estructural del *sistema Zollinger*.
The structural pattern of the Zollinger system.

Figura 311: Picadero en la afueras de Copenhague construido con el *sistema Zollinger*.
Riding school in the outskirts of Copenhagen built using the Zollinger system.

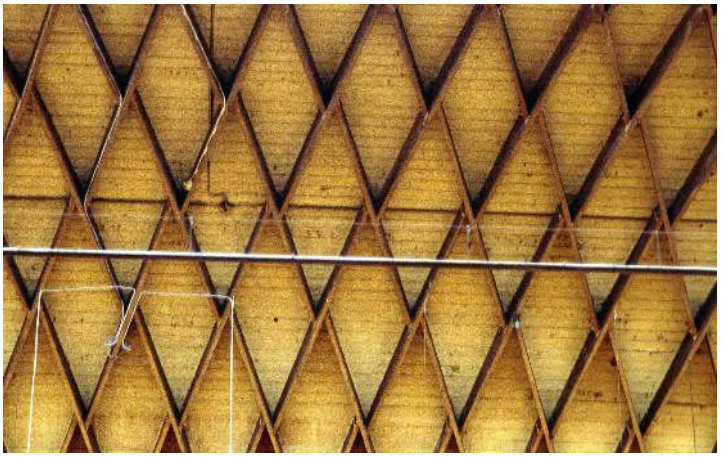


Figura 312: Detalle de la cubierta.
Cover detail.

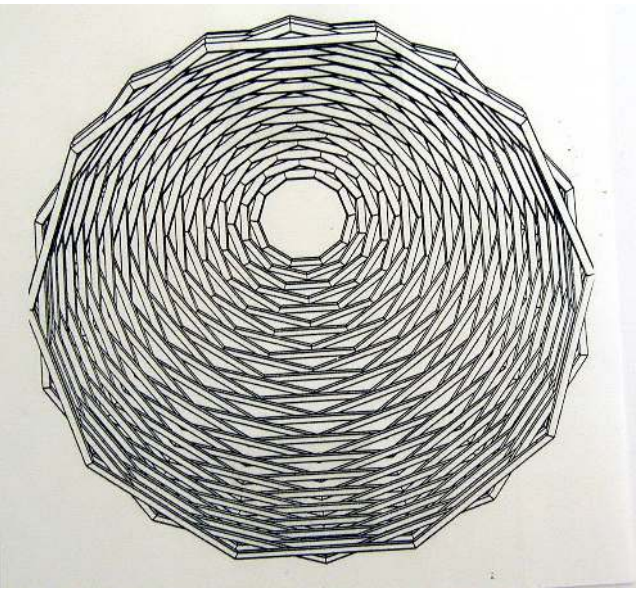


Figura 313: Cúpula basada en el principio del arco encamonado.
Dome based on the principle of the wooden framed arch.

Its use in our time is, as we said, mainly associated with the exploration of design. One example is the folly designed by the architects Alvaro Siza and Souto de Moura, with the help of Cecil Balmond of ARUP in the structure, for the London *Serpentine Galleries* in the summer of 2005.
In the theory of structures it gave rise to the vibrant concept known as reciprocal structures, although it is always associated with new designs. The greatest problem with these structures is that they are internally isostatic, which does not lead to very robust designs.
To end this section, figure 313 shows a semi-spherical dome which uses the wooden framed arch principle. It was designed by the author at the beginning of the 1990s, although it has never been constructed. It was inspired by the surprising baroque dome of Chapel of the Holy Shroud in Turin Cathedral, which is by the architect Guarino Guarini and dates from the end of the 17th century. I think that it was also inspired by wickerwork baskets, although it lacks their central ribs.
I believe that this history illustrates the permanent dialogue between constructive and structural technique and the ideas in a project, in which they feedback into each other.
The role and importance of structure varies from case to case, as it should. The quality of a work does not depend on the specific technique used, but rather on how it is used: i.e., on the quality of the project. Although this process of leaving and returning has also been common in other types of technique, the current situation is more volatile and varied. But over the mid to long term I do not believe that things will change, given that there is no other route.

Su empleo en nuestros días está, como se decía, asociado principalmente a la exploración formal. Un ejemplo es la *folly* diseñada por los arquitectos Alvaro Siza y Souto de Moura, asistidos por Cecil Balmond de ARUP en la estructura, para *Serpentine Galleries* de Londres en el verano de 2005.
En la teoría de estructuras ha dado lugar a lo que se ha llamado *estructuras recíprocas*, con una notable vitalidad. Pero siempre asociado a nuevas propuestas formales. El mayor problema de estas estructuras es que son internamente isostáticas, lo que no produce diseños demasiado robustos.
La figura 313 muestra, para finalizar, una cúpula semiesférica que utiliza el principio del arco encamonado, diseñada por el autor de este texto a principios de los años 90. No se ha construido. Está inspirada en la sorprendente cúpula barroca de la Capilla del Santo Sudario de la Catedral de Turín, obra del arquitecto Guarino Guarini, y edificada a finales del XVII. Y pienso que, también, en los cestos de mimbre, aunque carece de los nervios meridianos.
Este recorrido ilustra, en mi opinión, el diálogo permanente entre la técnica constructiva y estructural y las ideas de proyecto. Se retroalimentan mutuamente. El papel y peso de la estructura depende de cada caso, como no podía ser de otro modo. La calidad de la obra no depende de la técnica utilizada, sino del uso que se haga de ella, es decir, de la calidad del proyecto.
Este proceso de ida y vuelta ha sido habitual también en otro tipo de técnicas. La situación actual es más volátil y diversa. Pero, a medio y largo plazo, no creo que la cosa cambie, ya que no hay otro camino.

Figura 314: Monasterio de Yuste, galería de acceso en la fachada a los jardines.
Yuste Monastery, entrance gallery in the garden facade.

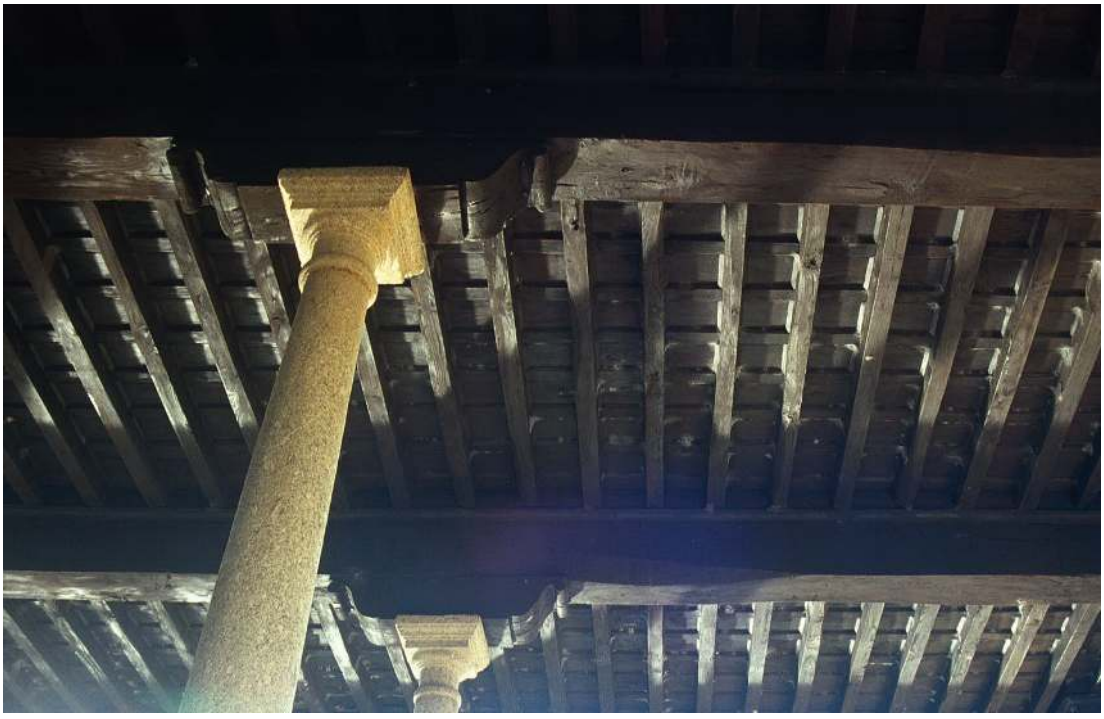


Figura 315: Forjado de techo de la galería de acceso desde los jardines.
Roof framework in the entrance gallery of the garden facade.

Monasterio de Yuste

**Yuste Monastery:
an exemplary wooden framework.**

Yuste Monastery was built at the end of the 14th century. It was expanded and renovated several times, and in the mid 16th century Carlos I lived there during his retirement.
In the facade that gives onto the gardens, figure 314, access is through a gallery with a classic wooden roof framework design, figure 315, which it is worthwhile to analyse.
This room has intermediate supports that are not obstacles at all. This allows the beams or main beams to reduce the span from less than 8 m to less than 4 m. When sawn wood is used, this reduction is enormously important. It means that reasonable cross-sections can be used. Without these supports, large beams would have been needed quite close to each other.
They would also have been very expensive, because such lengths are not easy or cheap to acquire. And the deflection over the long term would have been appreciable.
Although each stone support has its capital, a wooden base was added; this is good practice, as it reduces the effective span of the beam and works as a "sacrificial piece". The contact between stone and wood, even in this indoor area, may lead to deterioration of the wood. It is far simpler to change the base than it is the beam.
The beams are about 2 m apart. This span makes it possible to use small cross-section tie-beams or purlins, which, when sawn wood is used, is a great saving.
The final important detail is the use of cintas and saetinos between the purlins and the large planks of the framework.
The cintas are the boards perpendicular to the purlins. They cover the inevitable joints which will appear between the planks of the frame due to hygroscopic movement. The saetinos are simple uprights that block the gap that would be left if only cintas were used, and they also create suitable spport for the planks. Cintas and saetinos eventually form a small framework.
This is therefore a good example of structural modulation and constructive know-how. This pattern is often used in traditional wood construction that is only able to use single pieces of wood. Sometimes this is more ornamental, and other times it is simpler.

**El Monasterio de Yuste:
un forjado de madera ejemplo de buen oficio.**

El Monasterio de Yuste se construye a finales del siglo XIV. Es objeto de diversas ampliaciones y reformas; siendo muy simbólica la de mediados del XVI para acoger el retiro de Carlos I.
En la fachada a los jardines, figura 314, el acceso se realiza a través de una galería cuya estructura de techo la forma un forjado de madera de diseño clásico, figura 315, pero que merece la pena analizar.
La estancia tiene soportes intermedios, nada molestos. Eso permite que las vigas, o jácenas, reduzcan su luz de menos de 8 m a menos de 4 m. Ese salto, cuando se usa madera aserrada, es brutal, ya que permite manejar una sección todavía razonable. Hacerlo sin esos soportes hubiera significado emplear grandes vigas bastante juntas; y muy caras porque, con esas longitudes, no son fáciles de conseguir. Y con todo, la flecha a largo plazo hubiera sido apreciable.
Los soportes de piedra ya tienen su capitel, pero se añade una zapata de madera; una buena práctica: reduce la luz efectiva de la viga y funcionan como "pieza de sacrificio". El contacto de piedra y madera, aún en ese espacio cubierto, puede acabar en deterioro de la madera. Cambiar la zapata es simple, mucho más que la viga.
Las vigas se separan a unos 2 m de distancia. Esta luz permite usar viguetas, o jaldetas, de pequeña sección; lo que, con madera aserrada supone, de nuevo, un gran ahorro.
El último detalle importante son las *cintas* y *saetinos* entre las viguetas y el tablazón que forma el forjado.
Las *cintas* son las tabillas perpendiculares a las viguetas. Su colocación tapa las inevitables juntas que van a quedar entre la tablazón del forjado debido a los fuertes movimientos de origen higroscópico. Los *saetinos* son simples alzas que tapan el hueco que dejaría el uso único de las *cintas*, creando además un adecuado apoyo al tablazón. *Cintas* y *saetinos* acaban formando un pequeño artesonado.
Se trata, por tanto, de un buen ejemplo de modulación estructural y saber constructivo. Este es un esquema recurrente en la construcción tradicional de madera, que sólo puede recurrir a la madera enteriza. A veces más ornamentado, otras así de simple.

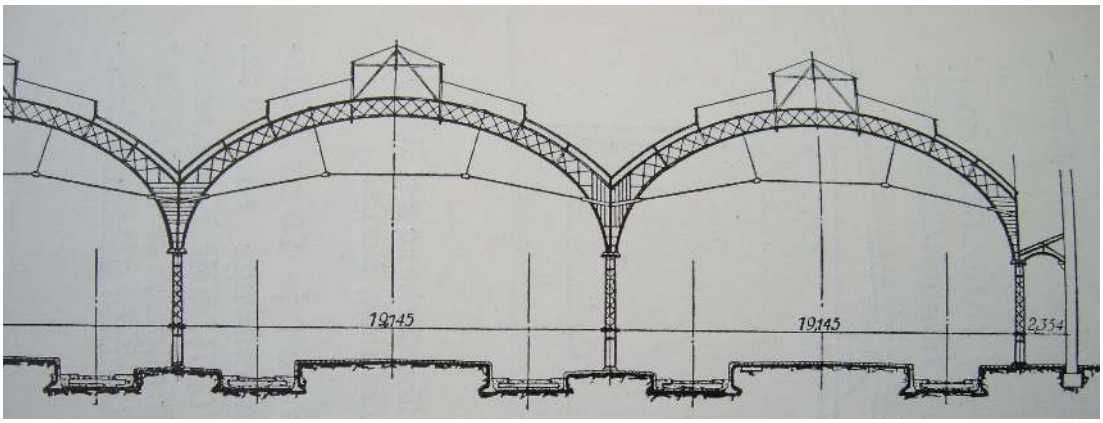


Figura 316: Estación de Copenhague, sección. *Copenhagen station, cross-section*

Figura 317: Vista general de la cubierta. *General view of the cover.*

Estación Central de Copenhague

**Copenhagen station:
consolidated types with new patents.**

The roof over the platforms in Copenhagen Central Station, figures 316 and 317, was built in 1912- 1913. It is still in use and is in perfect condition.
This type is not new, as from the mid-19th century similar solutions had been used (see Krings, 1985). The novelty here is the use of wood, and moreover of a patented system that still used sawn wood known as the Stephan system.
This idea was developed by the German architect and carpenter Philipp Stephan at the end of the 19th century. He started to commercialise it in 1902, figure 320.
This is a fretwork arch, although basically the classical concept of a wood-framed arch is present here. But as well as the nails, there are also metal braces between the diagonals. Although this system was presented as suitable for spans of up to 40 m, it was used for smaller spans of up to about 20 m.
At the time there was a revolution in the use of wood for construction in Germany. Many current systems first appeared then, and this period is being rediscovered now. The number of projects and the variety of solutions is surprising.
The main arches span 19.145 m. The arches support a double system of purlins, figure 318, which are also made of sawn wood, with braces where they start to reinforce them while also stabilising lateral flexing of the arch.
These painstaking details are firmly based on carpentry criteria. The purlins closely support the rafters which in turn support the planking at the base of the roof. The breakdown and modulation here are impeccable.
Another family of arches is added between the supports. Although these are largely used as a compositional resource, they are rationalised by the addition of uprights which are quite close to each other.

**Estación de Copenhague:
tipos consolidados con nuevas patentes.**

La cubierta de los andenes de la Estación Central de Copenhague, figuras 316 y 317 se construye entre 1912 y 1913. Sigue en uso y en perfecto estado.
El tipo no es nuevo, desde mediados del XIX se plantean soluciones similares (véase Krings, 1985). La novedad es el uso de la madera. Y, además, de un sistema patentado que todavía emplea madera aserrada, el llamado sistema Stephan. La idea es del arquitecto y carpintero alemán Philipp Stephan, que lo desarrolló a finales del XIX y lo comienzó a comercializar en 1902, figura 320. Se trata de un arco en celosía. En el fondo está presente el concepto clásico de *arco encamonado*. Pero, además de los clavos, aparecen unas llaves metálicas entre las diagonales. Lo presenta como apto para luces de hasta 40 m aunque se usará con luces más moderadas, de hasta 20 m aproximadamente.
En esos momentos se produce una verdadera revolución de la construcción en madera en Alemania. Muchos de los sistemas actuales nacen entones. Se trata de un periodo que se está redescubriendo ahora. El volumen de proyectos y la variedad de soluciones es algo sorprendente.
La luz de los arcos principales es de 19,145 m. Sobre ellos apoya un doble sistema de correas, figura 318, también de madera aserrada, con jabalcones en su arranque que ayudan a la correa pero también a estabilizar el pandeo lateral del arco. Son detalles muy carpinteros, muy cuidados. Sobre las correas apoyan los pares, a poca distancia, que sirven de apoyo a su vez a la tablazón que es la base del cerramiento. El despiece y la modulación son impecables.
Entre soportes se añade otra familia de arcos. Su uso tiene mucho de recurso compositivo, pero se racionaliza con el añadido de montantes bastante próximos.

Figura 318: Detalle de correas y pares. *Detail of the purlins and rafters.*

Figura 319: Arranque de los arcos. *The base of the arches.*

Figura 320: Detalle del sistema Stephan.
Detail of the Stephan system.

El arco tiene un tirante elevado en el centro para ganar gálibo, figura 316, algo característico de este tipo de soluciones. Su anclaje es típico en madera, muy simple y eficaz, figura 319.
Por supuesto, no se olvidan de introducir una buena iluminación cenital.
De nuevo estamos ante una arquitectura que no es de autor sino que está generada, en este caso, desde la industria. Dado lo emblemático de la obra, hoy sería algo impensable. Pero, como sabemos, en ese momento la situación era bien distinta, en especial en edificios industriales y de infraestructuras. También es verdad que, a comienzos del siglo XIX, era mucho más fácil ejecutar una obra moderna y racional si el arquitecto intervenía poco o nada.
El proyecto es una combinación de un tipo de estación ya consolidado y que funciona con una solución constructiva novedosa. O relativamente nueva, porque incluso ahí hay también un fuerte enlace con la tradición de la madera. Es decir, una evolución totalmente clásica, y que ha dado lugar a una arquitectura de gran calidad.
El proyecto se plantea desde el oficio, lo que incluye, no solo el dominio de una técnica constructiva sino, también, de un saber hacer desde la arquitectura. A lo último ayuda el manejo de un tipo consolidado.
Es muy interesante comparar esta obra con la cubierta de los andenes de la Estación de Malmö (véase la página 293), construidas casi a la vez y con mucha proximidad geográfica. La introducción de la madera laminada, en este tipo, produce sin duda una mejora; da una solución más robusta. La patente de Stephan tendrá, con ello, una corta aunque intensa vida. Aunque hay que subrayar que ambas obras han llegado a nuestros días en un estado de conservación impecable.

The arch has a raised strut in the centre to gain height, figure 316, which is typical of solutions of this type. Its anchorage is typical in wood, and it is very simple and effective, figure 319.
Of course, they did not omit adding good lighting from above.
Once again, this is not architecture as art but rather of an industrial type. Given the emblematic nature of this work, nowadays it would be unthinkable. But as we know, at the time the situation was very different, most especially in industrial buildings and for infrastructure. It is also true that at the start of the 20th century is was far easier to create a modern rational work if the architect played hardly any role in it or even none at all.
This project is a combination of a consolidated type of station with a new or relatively new constructive system, as even here it ties in with a very strong tradition in the use of wood. So this is a completely classical evolution that has given rise to very high quality architecture.
This project arose from expertise that included not only the domination of a constructive technique, but also architectural know-how, which helped to make use of a consolidated type.
It is highly interesting to compare this work with the station roof at Malmö (see page 293), which was constructed nearby and at almost the same time. The use of laminated wood in the latter type was without doubt an improvement, offering a more robust solution. Stephan's patent would therefore have a short but intense life. However, it must be said that both works have reached us in perfect condition.

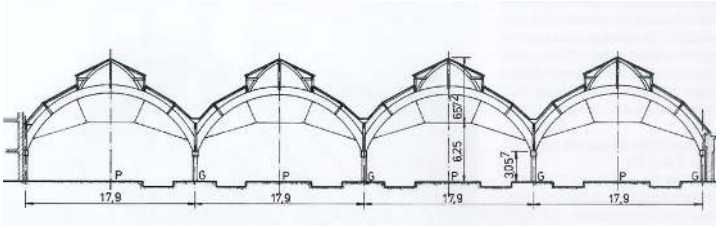


Figura 321: Estación Central de Malmö, sección por los andenes.
Malmö Central station, cross section.

Figura 322: Imagen de los andenes.
View of the platforms.

Figura 323: Detalle de arranque de los arcos.
Detail of the bottom of the arches.

Estación Central de Malmö

**Malmö Central Station:
the start of laminated wood.**

The roof of Malmö Central Station, figures 321 and 322, was built in 1922; it replaced another earlier metal one that had been damaged in a fire. This roof is still in place in an impeccable condition.
It is not a new type, as similar solutions had been used from the mid 19th century (see Krings, 1985). The novelty here lies in its material: laminated wood.
Although it had been used in the second half of the 19th century, it started to be used industrially from the start of the 20th century, when Germany pioneered its use. In central and northern Europe in the 1920s this technique was used in a large number of works of a surprisingly wide range of types, very similar to the current range. The main span of the arches is almost 18 m, with a double-**T** cross-section. Nowadays this would be unthinkable for laminated wood, but it was common when it started to be used as the cost of material amounted to a much larger proportion of the total cost than labour. There are a set of purlins over the arches, with closely arranged rafters to support the planking of the roof base. Nevertheless, in another area the arches are closer together and a system of purlins that are also closer together is used, without rafters.
Other smaller arches are formed between the supports, as well as in the skylights, with pointed arches. In both cases the shape of the arch is determined more by a desire for compositional unity than it is by structural factors.
The struts are raised in the centre to leave a free height of 6.25 m. Their anchorage is simple and effective, figure 322, and it originates in the world of woodwork.
This is not an author's design, as it is based on engineering and industry, on expertise itself. Architectural quality here arises from the use of a consolidated type. Pure classicism.

**Estación Central de Malmö:
los comienzos de la madera laminada.**

La cubierta de los andenes de la Estación Central de Malmö, figuras 321 y 322, se construyó en 1922, sustituyendo a otra anterior metálica de 1890 dañada después de un incendio. Todavía está en uso en un estado impecable.
El tipo no es nuevo, desde mediados del XIX se plantean soluciones similares (véase Krings, 1985). La novedad está en el material: madera laminada.
Aunque había precedentes de la segunda mitad del XIX, industrialización de la madera laminada es de comienzos del XX, siendo Alemania pionera. En los años 20, en el centro y norte de Europa, el volumen de obras con esta técnica es importante. Y el repertorio de tipos sorprendente, muy cercano al actual.
La luz principal de los arcos es de casi 18 m, con una sección en doble **T**; algo hoy impensable en la madera laminada pero muy frecuente en los inicios, cuando el material influía mucho más que la mano de obra en el coste total.
Sobre los arcos, una familia de correas y luego pares próximos para apoyar la tablazón base del cerramiento. Aunque, en otra área, se juntan más los arcos y se va a un sistema de correas más próximo, sin pares.
Entre soportes se forman otros arcos menores; y en los lucernarios, con arcos apuntados. En ambos casos, la forma de arco nace más desde una voluntad de unidad compositiva que desde la estructura.
Los tirantes se elevan en el centro para dejar un gálibo de 6,25 m. Su anclaje es simple y eficaz, figura 322, propia del mundo de la madera.
No es un diseño de autor; es un diseño realizado desde la ingeniería y la industria; desde el oficio, en definitiva. La calidad arquitectónica se apoya en el uso de un tipo consolidado: Clasicismo en estado puro.

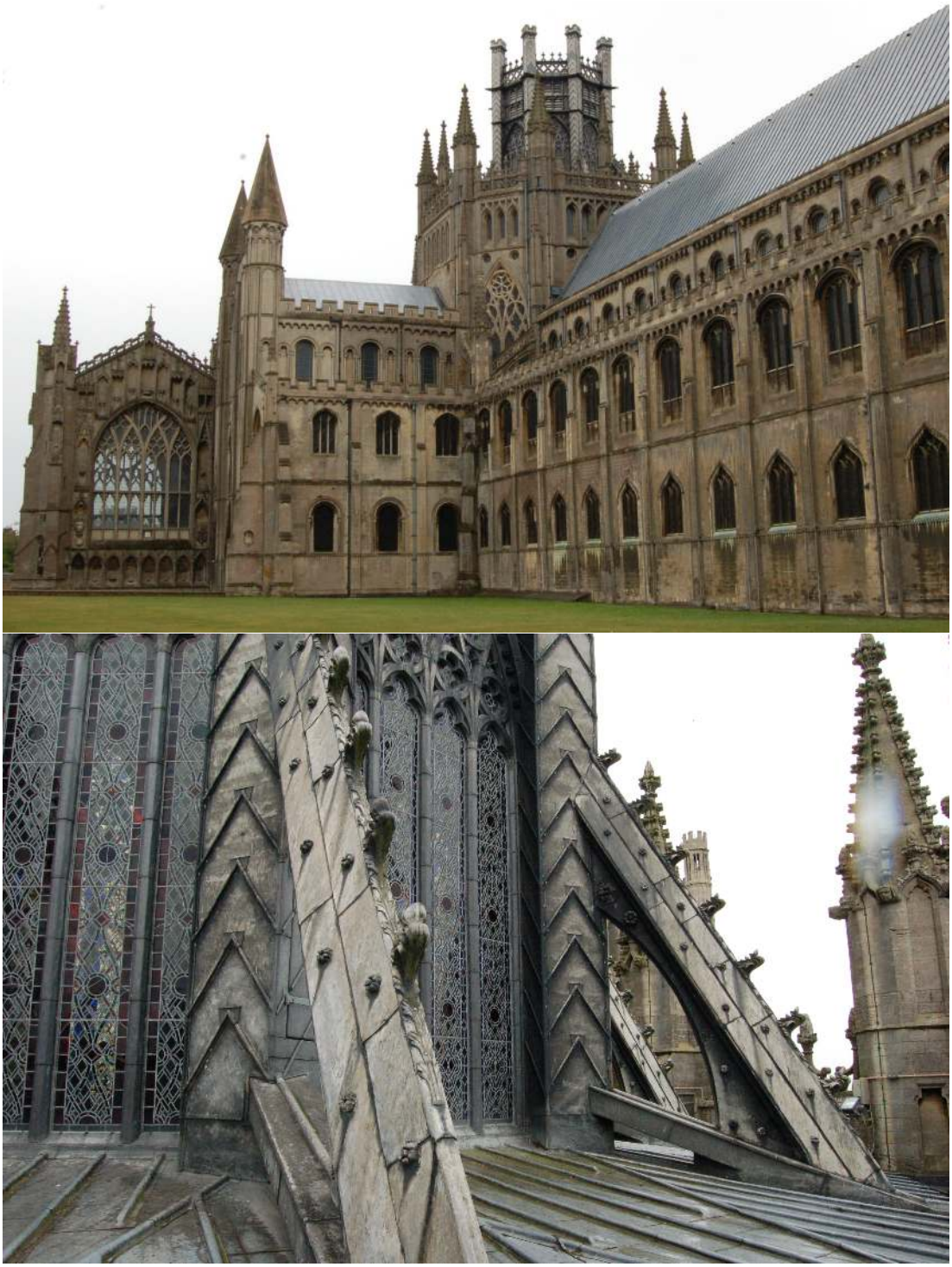


Figura 324: Catedral de Ely, vista general y del exterior de la linterna. *General view and the outside of the lantern.*

Cúpula del crucero, Catedral de Ely

Figura 325: Maqueta de la estructura de la cúpula de madera y su linterna.
Model of the structure of the wooden tower and lantern.

The Octagon, Ely Cathedral:
a masterful pattern that almost doubled the span, using wood.

The first buildings in Ely Monastery date from 673. The Cathedral, figure 324, was built from the end of the 11th century to the end of the 12th century, in its current form with a nave and two aisles. The nave has a span of 12 m. The aisle on the choir side was expanded in the 13th century.
Major renovation work started in 1321. In 1322, almost 200 years after it was built, the central tower which We imagine was made of stone fell. This was not a rare event, especially when works were in progress, and above all when the balance was precarious. The nave and aisles were rebuilt with the same span. It seems that Alan of Walsingham, the Monastery prior, proposed eliminating the four central pillars from the transept and creating an octagonal tower, thereby almost doubling the span of the nave, figure 328. He therefore became the architect of the new work.
The octagonal space was covered by a wooden tower with a timber framework, figure 325, topped by a lantern with large windows, figure 326. Lead was used outside as the roofing material, figure 324. The inside of the roof is also made of wood, figures 326 and 327.

Cúpula del crucero, Catedral de Ely:
unas trazas maestras que casi doblan la luz, uso de madera.

Las primeras construcciones del monasterio de Ely se remontan al 673. La Catedral, figura 324, se construye entre finales del XI y finales del XII, con la configuración actual de 3 naves, la central de 12 m de luz. En el XIII se amplía la nave del lado del coro.
En 1321 se inicia una gran reforma. En 1322, pasados casi 200 años de su construcción, colapsa la torre central del crucero, suponemos que hecha de fábrica de piedra. No es tan raro que eso suceda, sobre todo al realizar obras en el entorno, especialmente si el equilibrio era precario. Se aprovecha para reconstruir las naves, con la misma luz. Parece que es Alan de Walsingham, prior del monasterio, quién propone eliminar los cuatro pilares centrales del crucero y formar una torre octogonal, con lo que casi duplicaba la luz de la nave central, figura 328. Es decir, el prior haría de arquitecto de la nueva obra.
El espacio octogonal se cubre con una cúpula de madera, formada por una estructura espacial de barras, figura 325, que se corona por una linterna con amplias vidrieras, figura 326. Al exterior se usa el plomo como cerramiento, figura 324. En el interior, la plementería es también de madera, figuras 326 y 327.

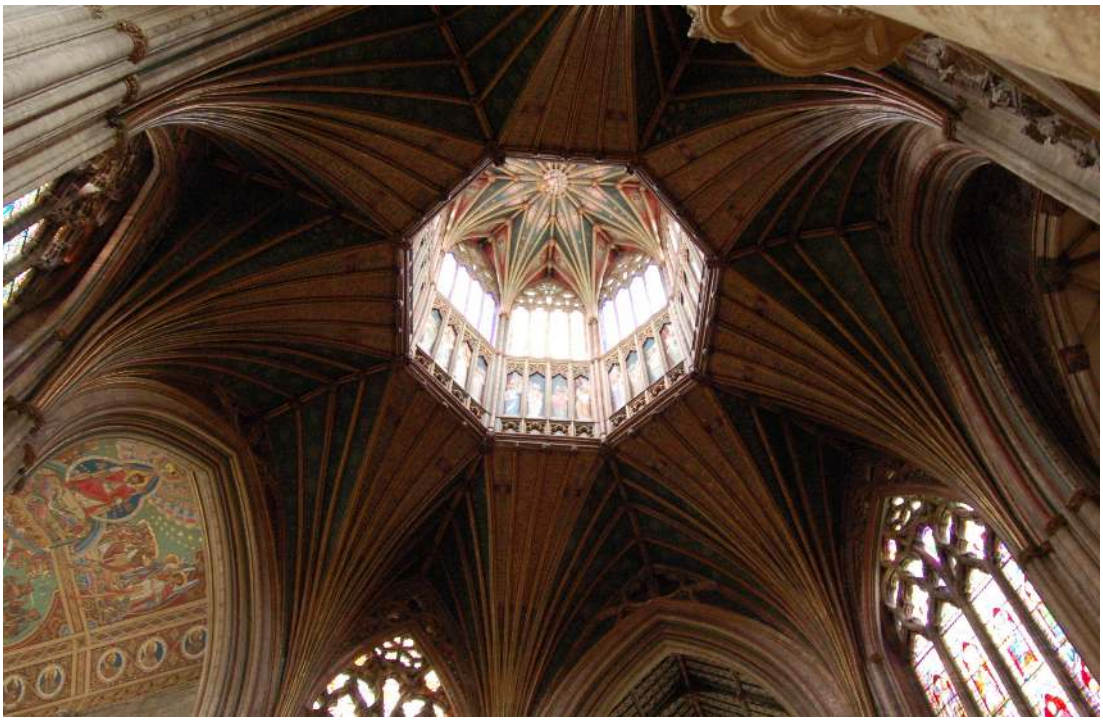


Figura 326: Interior de la cupula de madera y su linterna. *View of the wooden octagon and the lantern.*

Figura 327: Cúpula y plementería en madera. *Timber structure of the tower and roof in wood.*

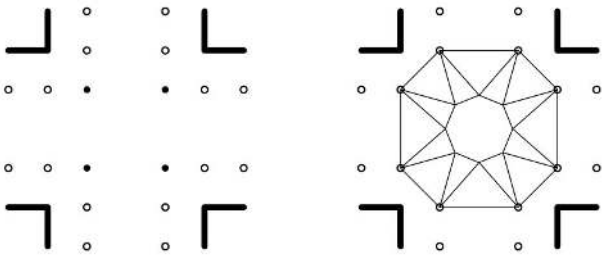


Figura 328: Génesis de la planta octogonal por eliminación de los cuatro soportes centrales del crucero: estado original (izquierda) y reformado (derecha).
Genesis of the octagonal floor plan by eliminating the four central piers of the transept: the original state (left) and the modified one (right).

La obra de madera la diseña y construye William Hurley, *Magister Carpentarius* de Edward III. Su construcción llevó 14 años. Se repara en los siglos XVIII y XIX. La última intervención es de 1991. Muchas de las maderas no son ya originales, como bien nos recuerda Hewett (Hewett, 1985, pag. 114) quién realiza una hipótesis de su proceso de construcción.

La Catedral es gigantesca, la longitud total es de casi 164 m. La torre occidental tiene 66 m de altura. La luz de la linterna es de 9,14 m. El octógono de apoyo de la cúpula de madera se inscribe en un cuadrado de 24 m de lado. Pero el octógono externo no es equilátero, sus lados miden 12 m y 8, 48 m de lado, aproximadamente, figura 328. La estructura de madera arranca, aproximadamente, a 19 m del suelo y alcanza una altura de 56 m.

La reparación dirigida por James Essex en 1757 fue muy importante. La estructura estaba en muy mal estado. Sustituye y, sobre todo, añade nuevos elementos. Y de paso elimina los contrafuertes de madera de la linterna, que luego restituirá la intervención del arquitecto Geroge Gilbert Scott y el ingeniero R. Reynolds Rowe entre 1862 y 1863. Las dos intervenciones, sobre todo la primera, salvan la obra.

La reparación de 1991 da pie a un estudio más moderno que ha puesto de manifiesto los graves errores de diseño con los que se construyó la estructura original (véase Wade y Heyman, 1985). Pero claro, ese análisis, que incluso ahora no es facilmente corroborable, no era siquiera imaginable en el siglo XIV. En su momento suponía una tecnología puntera y todo un alarde estructural.

La cúpula, con su linterna, es una de los mayores y mejores logros de la carpintería tradicional británica, y una obra singular en el panorama europeo. Su diseño está ligado al uso de la madera como forma de reducir los empujes frente al uso de la fábrica de piedra. No es la primera vez que esto sucede en obras históricas (véase el apartado del Arco Encamonado, página 275). Pero arranca de un deseo, anterior, de casi doblar la luz de la nave central al eliminar los cuatro soportes centrales del crucero. Esa voluntad de alarde está en el corazón de muchas de las obras de arquitectura. Su éxito o fracaso depende de cada caso concreto. Aquí tiene una base muy sólida, supone una evolución y mejora de un tipo consolidado hecha con una operación geométrica maestra.

The woodwork was designed and built by William Hurley, the Magister Carpentarius of Edward III. It took 14 years to build, and it was repaired in the 18th and 19th centuries. It was last repaired in 1991. Many of its timbers are therefore no original, as Hewett reminds us (Hewett, 1985, pag. 114) and he hypothesised about how it was built.

This Cathedral is immense, as it is almost 164 m long. The western tower is 66 m tall, and the lantern has a span of 9.14 m. The octagon that supports the wooden lantern occupies a square with 24 m long sides. However, the external octagon is not equilateral, as its sides measure approximately 12 m and 8.48 m, respectively, figure 328. The timber structure starts at approximately 19 m above the floor and reaches a height of 56 m.

The repair directed by James Essex in 1757 was very important, as the structure was in very poor condition. He replaced some elements and most importantly added new ones. He also removed the wooden buttresses of the lantern, although these were later replaced by the architect George Gilbert Scott and the engineer R. Reynolds Rowe in 1862 and 1863. Both of these repairs, and most especially the first, saved this work.

The 1991 repair led to a more modern study that showed the serious design errors committed in the original structure (see Wade and Heyman, 1985). But of course, this analysis, which even now is hard to corroborate, could not even have been imagined in the 14th century. At the time the design was cutting-edge technology and a structural display.

The octagon and lantern is one of the finest and best works of traditional British carpentry, and it is unique within Europe. Its design is linked to the use of timber as a means of reducing forces in comparison with stonework. This is not the first time that this happened in historical works (see the section on wooden–framed arches, page 275). But it was born from the desire which existed beforehand to almost double the span of the nave by eliminating the four central piers from the transept. This desire for display is at the heart of many architectural works. Whether it succeeds or fails depends on each specific case. Here it has a very solid basis, while it evolves and improves a consolidated type by means of a masterful geometrical operation.

Figura 329: El aviario Snowdon, vista general. *Snowdon Aviary, general view.*

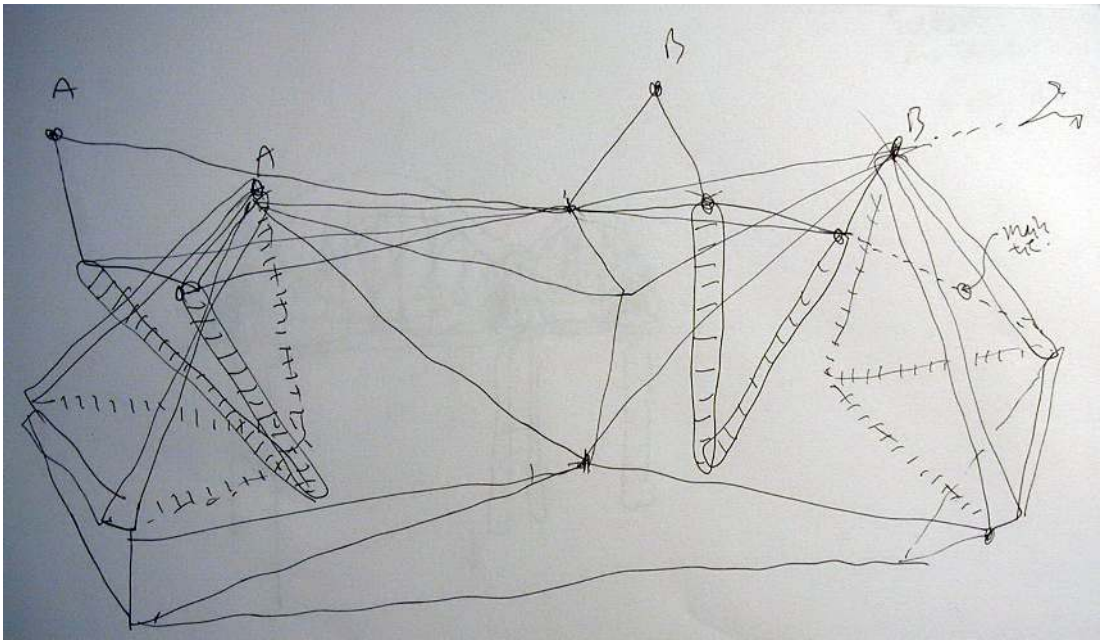


Figura 330: Esquema estructural. *Structural pattern.*

Aviario Snowdon

London Zoo Aviary:
the play of weightlessness.

The Snowdon Aviary in London Zoo (1961-64), figures 329 and 330, is by the architect Cedric Price and the engineer Frank Newby. This is one of the first works by Price as an independent architect, and he was the work leader.
This work was promoted by the photographer and film director Antony Armstrong-Jones, the 1st Earl of Snowdon, giving rise to the name of the aviary. It was he who selected Price for the work.
Although few works by Cedric Price have been built, his projects and thought have been highly influential. Projects such as the Fun Palace (1961), developed together with Joan Littlewood, the theatre director and never built, influenced subsequent works in what is known as the high tech movement in the 1970s. Although as an architect he is fascinated by technology, he always places it in a richer context. This aviary has something of tensegrity structures in its plasticity and play with weightlessness. He was in fact a friend and great admirer of Buckmaster Fuller. He worked with him in 1962 on the design of a small auditorium in Bath called the Claverton Dome, which uses a geodesic dome.
Nevertheless, I believe that its most direct influence is the sculpture Skylon (1951) which was designed by the architects Hidalgo Moya and Philip Powell for the Festival of Britain, while the engineer who developed its structure was Felix Samuely. Frank Newby worked in the office of Felix Samuely on this project, so that any design similarities are more than casual.
The spirit driving this project was clearly described by Cedric Price: "A secondary, but most important, function of buildings at the Zoo is to intrigue and interest the public. Birds are difficult to see at a distance so their container becomes their advert." (Price, 2003(1984), pag. 32). The effect of surprise arises due to the feeling that the four tetrahedrons at the ends are weightless, figures 330 and 334. For this he uses the same compositional mechanism that was used in *Skylon*: although these are massive elements that are supported from the bottom by a cable with **V**–shaped supports, at the top they rise above the supports that hold them up. Cables are then added to make this a structure rather than a mechanism; but that is the basis of the whole project.

El aviario del zoo de Londres:
el juego de la ingravidez.

El aviario Snowdon del zoo de Londres (1961-64), figuras 329 y 330, es obra del arquitecto Cedric Price y el ingeniero Frank Newby. Es una las primeras obras de Price como arquitecto independiente, líder de la obra.
La obra es promovida por el fotógrafo y director de cine Antony Armstrong-Jones, Conde de Snowdon (de ahí el nombre del aviario) quién busca a Price para el trabajo.
Cedric Price es un arquitecto con poca obra construida, pero cuyos proyectos y pensamiento han tenido gran influencia. Proyectos como el Fun Palace (1961), desarrollado junto al director de teatro Joan Littlewood, y no construido, se reflejan en posteriores obras de la llamada *high tech* de los 70. Es un arquitecto fascinado por la tecnología, pero siempre definida en un contexto más rico.
El aviario tiene algo que ver con las estructuras *tensegrity* en lo plástico, en el juego con la ingravidez. De hecho, Price fue amigo y tuvo gran admiración por Buckmister Fuller. Con él colaboró en 1962 para el diseño de un pequeño auditorio en Bath llamado Claverton Dome, envuelto en una cúpula geodésica.
Pero yo creo que la referencia más directa es la escultura *Skylon* (1951) diseñada por los arquitectos Hidalgo Moya y Philip Powell para el *Festival of Britain*, siendo Felix Samuely el ingeniero que desarrolla la estructura. Frank Newby trabajó en la oficina de Felix Samuely en ese proyecto, por lo que los parecidos formales son algo más que casuales.
El espíritu que impulsa el proyecto está muy bien definido por Cedric Price: "A secondary, but most important, function of buildings at the Zoo is to intrigue and interest the public. Birds are difficult to see at a distance so their container becomes their advert" (Price, 2003(1984), pag. 32).
El efecto sorpresa se genera con la sensación de ingravidez de los cuatro tetraedros de los extremos, figuras 330 y 334. Y para ello usa el mismo mecanismo compositivo que en el *Skylon*: elementos masivos que apoyan inferiormente desde un cable por soportes en **V**, pero su cota superior asciende por encima de los soportes que los sustentan. Luego se añaden cables para que aquello sea una estructura y no un mecanismo; pero ese es el punto de partida de todo el proyecto.

Figura 331: Cerramiento de malla de acero.
Steel mesh enclosure.

Figura 332: Detalle de unión de esquina de los tetraedros.
Detail of the tetrahedron corner joint.

Figura 333: Voladizo de la pasarela en zigzag.
The raised zigzag walkway.

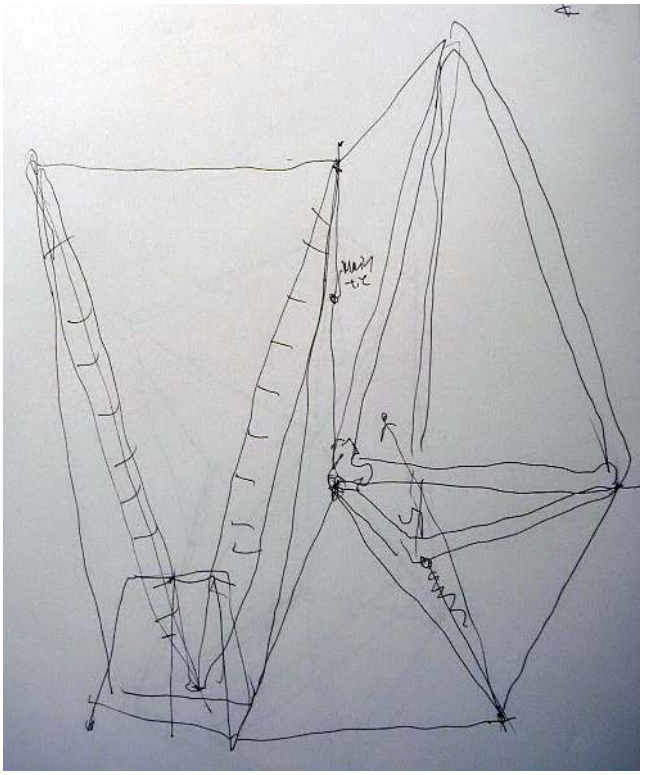


Figura 334: Tetraedros colgados desde los soportes en **V**.
Tetrahedrons hanging from ***V****–shaped supports.*

Solo los soportes en **V** y los tetraedros se forman con gruesos perfiles; el resto son cables, lo que ayuda a la sensación de que los cuatro tetraedros flotan. La obra tiene una doble simetría que, con una geometría tan dinámica, pasa casi desapercibida.
El cierre con la malla soldada, en un juego irregular y acrisolado de superficies, figura 331, añaden la impronta final a la obra. Los detalles se cuidan con esmero, figura 332, además de cables y tubos, aparecen uniones de fundición de aluminio y enlaces de acero inoxidable.
Dentro del zoo aparece una interesante pasarela en zigzag en doble voladizo hecho con hormigón pretensado, figura 333, con una esbeltez dimensionada, en palabras de Newby, para no sufrir vibraciones desagradables. El paso en zigzag obliga al visitante a cambiar de perspectiva.
El recurso a la estructura tensada dista mucho de ser una necesidad técnica. Aquí el punto de partida es escultural. Se juega a la ingravidez, y es entonces cuando se recurre a los cables. La malla, que tiene una razón de ser incuestionable, permite la transparencia y añade más innovación al proyecto. La obra, finalmente, refleja muy bien lo que es: Es estupenda.

Only the **V**–shaped supports and tetrahedrons are composed of thick sections, as everything else consists of cables which emphasises the feeling that the four tetrahedrons are floating. This work has a dual symmetry which goes almost unnoticed in such a dynamic geometry.
This work is rounded off and marked by the welded mesh enclosure and the refined play of irregular surfaces, figure 331.
Details here are painstakingly created, figure 332, as well as cables and tubes there are aluminium joints and stainless steel connectors.
Within this aviary there is an interesting double raised zigzag prestressed concrete walkway, figure 333, with a slenderness of a size, as Newby said, to avoid suffering unpleasant vibrations. This zigzag path forces you to change your viewpoint.
The use of a tensile structure is not at all technically necessary here. The basis of this work is sculptural. It plays with weightlessness, and this is why cables are used.
The mesh, which is completely necessary, is transparent and makes the project more innovative. This work finally reflects very well what it is. And it is stupendous.

Figura 335: Pérgola del FORUM 2004. *The FORUM 2004 pergola.*

Figura 336: Detalle del extremo del voladizo. *Detail of the edge of the cantilever.*

Pérgola del Forum

The Forum Pergola:
symbiosis between the project concept and its structure.

The pergola covered in photovoltaic panels, figures 335 and 336, designed for the Forum of Cultures in Barcelona in 2004, is by the architects José Antonio Martínez Lapeña and Elías Torres. The structure is by the engineering company ESTEYCO.
The pergola or pavilion is part of a broad expanse reclaimed from the sea as the setting for large gatherings; a large square which is able to hold a wide range of events.
The roof, which has a surface area of 112 m×50 m, is covered in photovoltaic panels, thereby expressing a clear message from the very first.
The main challenge for this structure is to withstand the wind, although it has a large span. It was very logical to select steel for the horizontal structure and concrete for the vertical structure.
The supports attain a maximum height of 43 m and a minimum height of almost 20 m, and they are almost 2 min diameter. Each one is a small sculpture in itself.
The roof structure is basically composed of two orders of reinforced steel beams with a box cross-section that in fact form a grid.
The main beams are 112 m long and have an average edge width of 3.5 m; it has two large cantilevers that greatly aid its good working.
The secondary beams are 50.66 m long with an edge width of 1.3 m, and once again they are strongly aided by a large cantilever. There is great expertise in this modulation.
Finally, some round cross-section tubes support the solar panels and maintenance walkways composed of steel tramex panels.
Wind here is surely the most unfavourable load. The anchorage of the steel roof to its concrete supports uses post-stressed DYWIDAG bars and GEWI bars by the same company, forming part of the foundations using permanent anchorages. In these works the structure that cannot be seen is as important as the structure that can be seen.
The location of this work means that its sculptural aspect is fundamental. And I believe that it is clearly successful in this sense. It is clearly by the architects who created it, as they use this abstract language masterfully.
Although I believe that the structure is not the source of this work, it is a part of the initial project concept and is resolved very well, with an enviable symbiosis.

La pérgola del Forum:
simbiosis entre la idea de proyecto y la estructura.

La pérgola cubierta de paneles fotovoltaicos, figuras 335 y 336, diseñada para el Fórum de las Culturas en Barcelona en 2004 es obra de los arquitectos José Antonio Martínez Lapeña y Elías Torres. La estructura es de la ingeniería ESTEYCO.
La pérgola, o pabellón, es parte de una gran explanada ganada al mar que se concibe como un gran lugar de reunión; una gran plaza susceptible de acoger diversos tipos de actos.
La cubierta, con una superficie de 112 m × 50 m, tiene como cerramiento paneles fotovoltaicos. Con ello, antes que nada, se lanza un claro mensaje.
La estructura tiene como reto principal resistir al viento, pero también tiene una luz importante. La elección del acero para la estructura horizontal y de hormigón para la vertical es muy lógica.
Los soportes tienen una altura máxima de 43 m, y una mínima de casi 20 m, con espesores de casi 2 m. Cada uno es en sí una pequeña escultura.
La estructura de cubierta se forma, básicamente, con un doble orden de vigas de acero armadas, con sección en cajón, que de hecho constituyen un emparrillado. Las vigas principales tienen una longitud de 112 m y un canto medio de 3,5 m; con dos grandes voladizos que ayudan a su buen funcionamiento. Las vigas secundarias tienen una longitud de 50,66 m y un canto de 1,3 m, y de nuevo son muy favorecidas por un fuerte voladizo. Hay mucho oficio en esa modulación.
Finalmente, unos tubos de sección circular sirven de apoyo a los paneles solares y a unas pasarelas de mantenimiento formadas con paneles de *tramex* de acero.
El viento es seguramente la carga más desfavorable. El anclaje de la cubierta de acero a los soportes de hormigón se realiza a través de barras DYWIDAG de postesado y de barras GEWI, de la misma empresa, que son parte de la cimentación con anclajes permanentes. En estas obras, la estructura que no se ve tiene la misma importancia que la que se percibe. Su ubicación hace que su componente escultórica sea fundamental. Y creo que el éxito, en ese sentido, es claro. La obra tiene el sello de los arquitectos que la firman, que manejan ese lenguaje abstracto de forma magistral. Yo creo que la estructura no es generadora, pero sí es parte de la idea inicial de proyecto y está muy bien resuelta, hay una simbiosis envidiable.

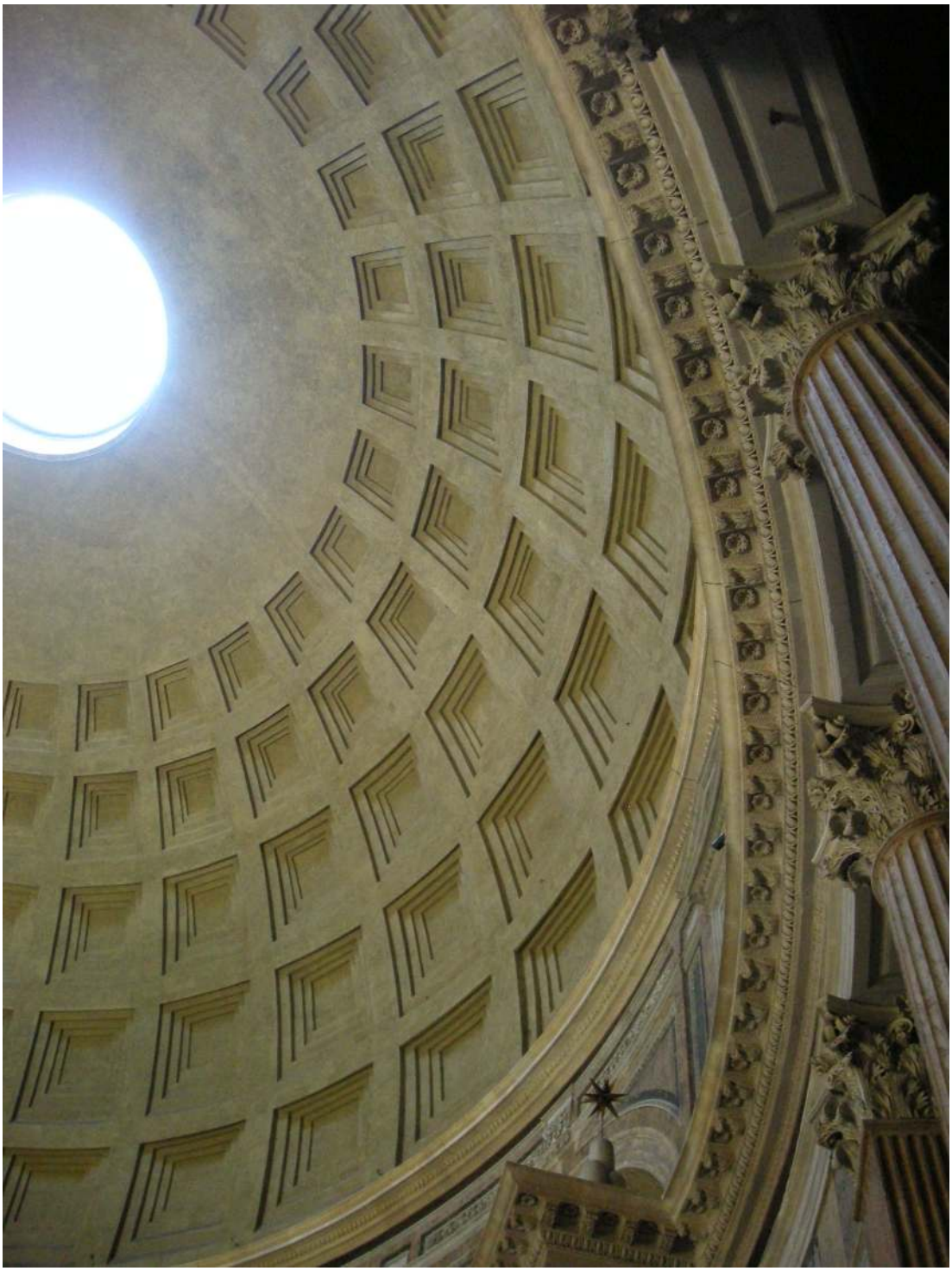


Figura 337: Cúpula del Panteón de Roma. *Dome of the Panteon in Rome.*

Panteón de Roma

The Roman Pantheon:
***ars* romana.**

The Roman Pantheon, figures 337 and 338, with its span of 43.44 m, was the largest building from its construction in the 2nd century (118-125) until the 19th century when steel and then concrete came into use thanks to the new science. That isn't bad at all.
Although the type was not new, examples had been built with spans of about 20 m, half of this. Doubling the span at that time was not normal and ran an enormous risk.
To be reliable empirical knowledge requires that spans be kept the same, or at the most with very small increases in size. Doubling the span was almost foolish, and this would only happen again in the 19th century, and even then it was not comparable.
The oculus has a diameter of 9 m and this light source is vital for the work. The dome is in concrete. They had discovered that a mixture of pozzolana, lime and water is able to set. This was an enormous technical advance, more so when it could even set under water.
There would be a range of concrete types, some of them lighter in the dome. The coffered ceiling has the purpose of reducing its weight, and the coffering also shows a larger quantity of material and its higher quality, in a grid of meridian and parallel lines.
The dome is lowered, so that it is all predominantly compressed by its own weight along meridian and parallel lines.
This is not a minor detail, as other domes which are not lowered such as the one in San Peter's basilica have cracked due to traction forces in the parallel lines close to the base. Although these cracks have not caused it to fall, they are very worrying.
This dome was probably built in parallel rings, so that it could be raised without using scaffolding, as Brunelleschi would do when he designed the dome of Saint Mary of the Flower, Florence (1418-34), an idea which led him to be awarded the work. The large central oculus supports this hypothesis.

El Panteón de Roma:
***ars* romana.**

El Panteón de Roma, figuras 337 y 338, con sus 43,44 m de luz, fue la mayor estructura de edificación desde su construcción en el siglo II (118-125) hasta el siglo XIX, cuando el acero, y luego el hormigón entran en escena de la mano de la nueva ciencia. No está mal.
El tipo no era nuevo, pero se había construido con luces de unos 20 m, la mitad. Aumentar la luz al doble, en ese momento, no era algo normal. Se corría un riesgo enorme. La fiabilidad del saber empírico dependía del mantenimiento de las luces, o como mucho de pequeños saltos de tamaño. Doblar la luz era casi una temeridad. Solo se volverá a ver algo así en el XIX, y ni siquiera es comparable. El óculo tiene un diámetro de 9 m. Huelga decir que esa entrada de iluminación natural es vital para la obra.
La cúpula es de hormigón. Los romanos descubrieron por primera vez la capacidad de fraguado de la mezcla de puzolanas, cales y agua. Supuso un enorme avance técnico; más aún cuando el fraguado se producía incluso dentro del agua.
Se emplearon diversos tipos de hormigón, más aligerados en la cúpula. La función de los casetones vistos al interior es precisamente la de reducir su peso. Dejan además la huella de la mayor cantidad de material y su mejor calidad según una red de meridianos y paralelos.
La cúpula es rebajada, lo que hace que, para peso propio, que es la carga predominante, toda ella esté comprimida en meridianos y paralelos. Otras cúpulas no rebajadas, como la de San Pedro, han sufrido la aparición de grietas por tracciones en los paralelos próximo al arranque (que aunque no condujesen al colapso generaron mucha alarma).
Su construcción probablemente se hizo mediante anillos paralelos, de manera que se pudo construir sin andamiajes, tal y como hará Brunelleschi al diseñar la Cúpula de Santa María de las Flores de Florencia (1418–34) (idea que, por cierto, le permitió adjudicarse la obra). El gran óculo central apunta a esa hipótesis.

Figura 338: Cúpula del Panteón de Roma. *Dome of the Panteon in Rome.*

This is a fine display of Roman engineering and a magnificent work of architecture. At the time there was no separation between both disciplines.
And not only that, as the concept of art as something independent of technique did not exist. The Greek techne had become the Roman ars. In both cases being an artist meant dominating a technique (see Shiner, 2001).
This allows us to understand the inscription in the votive temple next to Alcántara bridge by the Romans at this time (104-106), with arches spanning almost 30 m: "Ars ubi materia vincitur ipsa sua".
Carlos Fernández Casado, who greatly admired Alcántara Bridge and studied many Roman works in the peninsula, translated this phrase as "art by which material overcomes itself". It is clear that this is a description of the arch, which for structures was similar in importance to the invention of the wheel. Not in vain was this inscribed in the temple as if it were the resolution of an enigma.
I believe that given the above point it would be more accurate to use the word "technique" instead of "art": "technique by which material overcomes itself". Perhaps Fernández Casado was afraid that the word technique could be misinterpreted, as it now has many more meanings and is almost never associated with its original meaning.
This work cannot be comprehended without this original concept of technique. On the other hand, you have to try to imagine the impression that this work could have caused in the 2nd century, although it is not easy to do so. Once again, this could only be compared with major engineering works in the 19th century, although nowadays we are rightly prouder of having landed a spaceship on the moon.
I believe that this work could be used to remind us of the first meaning of the word technique, which was inseparable from art.
What we understand now by mastering a technique does not always lead to high quality works of architecture or engineering. But for a Greek or a Roman this would have meant that the technique had not really been mastered. This is another way of looking at things, and it may be the correct way.
Nowadays in fact there is increasing demand for this complete dimension of technique in engineering, and this is as it should be.

Se trata, por tanto, de un alarde de la ingeniería romana, y de una magnífica obra de arquitectura. En ese momento no había separación entre ambas disciplinas.
Pero no solo eso. El concepto de arte, como algo independiente de la técnica, no existía. La *techne* griega pasa a ser *ars* romana. En ambos casos, ser un artista significaba dominar una técnica (véase al respecto Shiner, 2001). Así se entiende mucho mejor la inscripción que aparece en el templo votivo construido junto al puente de Alcántara por los romanos en esa misma época (104–106), con vanos en arco de hasta casi 30 m de luz: "Ars ubi materia vincitur ipsa sua".
Carlos Fernández Casado, que tuvo gran admiración por el puente de Alcántara y estudió muchas de las obras romanas de la península, tradujo esta frase como "artificio mediante el cual la materia se vence a sí misma". Es claro que se trata de una definición del arco, que en estructuras fue como el invento de la rueda. No en vano lo dejan grabado en el templo como si fuese la resolución de un enigma.
En mi opinión, sería más justo usar la palabra *técnica* en lugar de *artificio*, (teniendo presente lo dicho anteriormente: "técnica mediante la cual la materia se vence a sí misma"). Quizás a Fernández Casado le dio miedo que la palabra *técnica* se pudiera malinterpretar, ya que hoy es mucho más polisémica, y casi nunca se relaciona con su significado original. En todo caso, no se puede entender la obra sin ese concepto original de *técnica*.
Por otra parte, hay que intentar imaginar la impresión que pudo causar esta obra en el siglo II. Y no es fácil. De nuevo, solo puede haber algo comparable en las grandes obras de ingeniería del XIX. Hoy día nos admira mucho más ser capaz de poner una aeronave en la luna.
Yo creo que esta obra puede servir para recordar ese primer significado de la palabra *técnica*, indisoluble del término *arte*. Lo que hoy entendemos por el dominio de una *técnica* no siempre produce obras de arquitectura e ingeniería de calidad. Pero, para un griego o un romano, lo que eso supondría es que en realidad no se dominaba la *técnica*. Es otra forma de verlo, puede que acertada.
De hecho, hoy día, desde la ingeniería, cada vez se reclama más esa dimensión global de la *técnica*. No puede ser de otro modo.

Figura 339: Vista exterior del Gimnasio Alemán.
Exterior view of the German Gymnasium.

Figura 340: Vista general interior de la cubierta.
General interior view of the roof.

Figura 341: Apoyo de las vigas de cubierta.
The bottom of the roof beams.

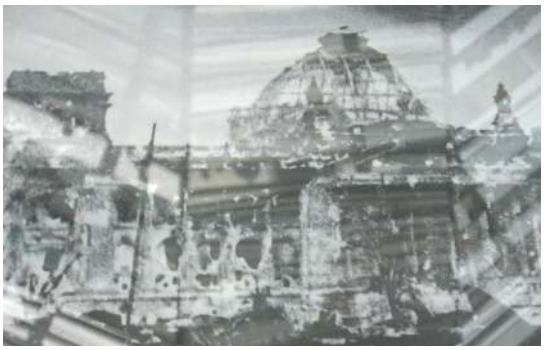
Gimnasio Alemán de Londres

The German Gymnasium, London
laminated wood starts to be used in a consolidated type.

The German Gymnasium in London (1864-65), near St. Pancras, is one of the first laminated wood structures in the United Kingdom and Europe. It was built for the German Gymnastics Society. The first laminated wood structure in the United Kingdom would seem to date from 1827, a chapel in Old Rusholme Road, Manchester. Other cases such as this were built in the 1850s and 1860s, although they were quite rare. The German Gymnasium only makes partial use of laminated wood, and it does so using a type that is commonly applied in steel, *Ardant* trusses, which competed at the time against those of the *Polonceau* type. The bases still use case iron cores, and in the centre there are wrought iron king posts, which in this case is completely logical. The purlins and planking are also in wood. The design of this structure is impeccable.
The change of material from iron to wood fits wonderfully with Ardant trusses, and I would say that it improves them. The warmth of this space finished in wood is almost perfect. One again, these are spaces designed on the basis of new trends set by engineering and industry.
The same cannot be said of the exterior, which although it is very worthy has little to do with the innovative nature of the interior. There was still a lot to do before the world of architecture modernised its language, and when it did, this would stem precisely from engineering and industry.

El Gimnasio Alemán:
comienzos de la madera laminada en un tipo consolidado.

El Gimnasio Alemán de Londres (1864-65), cerca de St. Pancras, es una de las primeras estructuras con madera laminada del Reino Unido y Europa. Lo promueve la *German Gymnastics Society*. La primera estructura de madera laminada de Reino Unido parece datar de 1827, una capilla en Old Rusholme Road, Manchester. En los años 50 y 60 aparecen otros casos, como este; pero de forma muy puntual.
El Gimnasio Alemán usa la madera laminada solo de forma parcial. Y además empleando un tipo frecuente en acero, las cerchas *Ardant*, que eran entonces las competidoras de las *Polonceau*. De hecho, en los arranques todavía se usa hierro fundido en el alma, y en el centro aparecen también péndolas de hierro forjado, en este caso con toda lógica. Correas y tablazón son también de madera. El diseño de la estructura es impecable.
El cambio de material de hierro a madera encaja magníficamente con la cercha *Ardant*, yo diría que la mejora. Y la calidez del espacio acabado en madera es casi inmejorable. De nuevo son espacios diseñados desde las nuevas tendencias marcadas por la ingeniería y la industria.
No se puede decir lo mismo del exterior, muy digno pero que tiene muy poco que ver con el carácter innovador del interior. Todavía falta mucho para que el mundo de la arquitectura modernice su lenguaje; precísamente de la mano de la ingeniería y la industria.



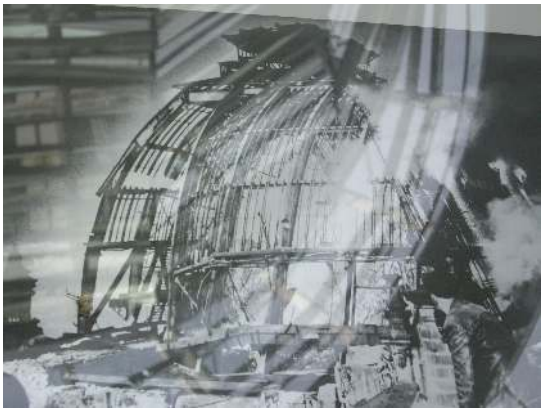


Figura 342: El incendio del Reichstag de 1933. *The Reichstag fire in 1933, with its metal dome burning.*

Figura 343: El Reichstag y la cúpula acristalada. *The new Reichstag with its glass dome.*

La nueva cúpula del Reichstag

**The new Reichstag dome:
an expertly resolved work.**

The current building of the German Parliament in Berlin, the Reichstag, figure 343, is the result of the renovation of a neoclassical work by the architect Paul Wallot. This was finished in 1894, and was inaugurated during the birth of the Second German Empire (1871-1918).
The building had a large steel and glass dome over the debating chamber, designed by the engineer Hermann Zimmermann. However, Wallot's original project for the same site was for a large neoclassical dome.
Pressures were applied during the process for Wallot to move the dome towards the lobby, making it more visible.
Eventually it was built in its original position, but with the debating chamber structure only half finished.
The solution was to use steel and glass, together with a somewhat lower height to lighten the structure.
Paradoxically it would eventually become the most interesting part of the building.
The building went on to become the Weimar Republic Parliament (1919-1933). On the night of February 27 1933, four weeks after Hitler had gained power, the building was burnt down deliberately, figure 342.
The dome, which had a square base, was in ruins. Apart from the four ribs at the corners, its structure was composed of arches that could not take advantage of the 3D to reduce flexion forces.
After the war, when Berlin was still within the Democratic Republic of Germany, the building was renovated from 1961 to 1973, making major changes and keeping possible reunification in mind.
Nevertheless the building really was fully renovated after German reunification in October 1990. A few years later it was decided to move the capital from Bonn to Berlin. A restricted competition was held (1992-93) to remodel the old Reichstag building to once again make it the Parliament building.
Although Norman Foster won this competition, he did not propose rebuilding the dome.
This proposal was made by Santiago Calatrava, who designed a new transparent dome to express the hoped-for transparency of the new parliament. Foster was awarded the work but after an unsuccessful legal challenge was forced to include a dome. The work was inaugurated in 1999.

**La nueva cúpula del Reichstag en Berlín:
una obra resuelta con mucho oficio.**

La actual sede del parlamento alemán en Berlín, el Reichstag, figura 343, es fruto de la reforma de una obra neoclásica del arquitecto Paul Wallot, finalizada en 1894, y que nace auspiciado por la creación del II Imperio Alemán (1871–1918).
El edificio se construye con una gran cúpula de acero y vidrio sobre la sala de plenos, diseñada por el ingeniero Hermann Zimmermann. Pero el proyecto original de Wallot, en ese mismo emplazamiento, era el de una cúpula neoclásica masiva.
En el proceso hay presiones para que Wallot mueva la cúpula hacia el vestíbulo, dándole con ello más visibilidad. Al final vuelve a su posición original, pero con una estructura de la sala de plenos medio acabada. La solución fue usar acero y vidrio, y algo menos de altura, para aligerar la estructura. Paradojas del destino, ya que sería, al final, su elemento más interesante y simbólico.
El edificio será después sede del parlamento de la República de Weimar (1919-1933).
La noche del 27 al 28 de febrero de 1933, cuatro semanas después de la llegada de Hitler al poder, el edificio ardió debido a un incendio provocado, figura 342. La cúpula, de base cuadrada, queda en estado de ruina. Su estructura, salvo en los cuatro nervios de esquina, se forma con arcos que no pueden aprovechar el 3D para reducir los esfuerzos de flexión.
En la posguerra, con Berlín todavía dentro de la República Democrática Alemana, el edificio se reforma entre 1961 y 1973, haciendo cambios importantes, y teniendo ya en mente una posible reunificación.
Pero la verdadera transformación llegó de la mano de la reunificación alemana, en octubre de 1990. Unos años después se decidió mover la capital de Bonn a Berlín. Se convocó un concurso restringido (1992–93) para remodelar el antiguo Reichstag y que volviese a ser la sede del parlamento. Lo ganó Norman Foster. Pero él no propuso la recuperación de la cúpula, sino Santiago Calatrava, que con el diseño de una nueva cúpula transparente quería reflejar la esperada transparencia del nuevo parlamento. Foster se llevó la obra pero se vió forzado a asumir esa propuesta de Calatrava (que, de paso, llevó a Foster a los tribunales acusándole de plagio, sin éxito). La obra se inauguró en 1999.

Figura 344: Rampa y sistema de paralelos y meridianos. *Ramp and the system of parallel and meridian rings.*

Figura 345: Rampas helicoidales. *Helicoidal ramps.*

Foster's design for the new dome used the same location as the original one together with more or less the same horizontal size, although it is lower and a different shape. The new dome has approximately the shape of a half ellipsoid of revolution, figure 343. It has a circular base 40 m in diameter and is 23.5 m tall, so it is a total of 47 m high above ground level, far less than the original 75 m. It rests on a ring above 12 new concrete columns. It is therefore a cupola of a respectable size, if we remember that the Pantheon in Rome spans 43.44 m.

The design of the structure, figures 344 and 345, which was created with the aid of well-known engineering company Leonhardt, Andrä und Partner, is impeccable: a steel frame of 24 meridians and 17 parallels which supports the glazing. It is finished in an open oculus. It is composed of (very interesting) quasi-triangular sections and rigid joints, preventing triangulations in the panels, figura 344. The behaviour of the structure is almost funicular. This is highly effective, far more so than that of the old dome.

The dome has two functions, firstly as a viewing gallery, with a circular platform about 15 m in diameter at a height of some 16 m over its base. This viewing gallery is reach by two 1.8 m wide helicoidal ramps (one going up and the other coming down), fixed at some distance to the meridian rings by two bars, figures 344 and 345, with a triangular cross-section that supplies the inertia against torsion needed due to the eccentricity of its support. This is a very interesting design, and the dual ramp works very well.

The second function of the dome is, as it was at first, to illuminate the debating chamber. To improve this function there is a sort of inverted cone lined with mirrors hanging over the chamber, figure 343. In my humble opinion and in spite of all the admiration I feel for Foster, I believe that this part of the work could have been improved.

Once Foster accepted the client's decision to include a transparent dome, his resulting design is very interesting. It logically also functions as a viewing gallery, with a magnificent system of two helicoidal ramps held some distance from the wall.

Together with Leonhardt, Andrä und Partner he designed a structure that is extremely rigorous and clean. All of this is a sign of the high level of expertise on both sides. Nobody could have imagined this history or all the different reasons why the old and new domes were both built of steel and glass.

Structure here is not the protagonist of the work, which was born of the desire for transparency. But the masterfulness of its design raises the quality of a work in which nearly everything is structure. It therefore plays an important secondary role that overshadows the protagonist.

El diseño de Foster para la nueva cúpula mantiene la ubicación de la original y, más o menos, su tamaño en planta, pero menor altura y un cambio de trazado. Tiene forma de, aproximadamente, medio elipsoide de revolución, figura 343, con una base circular de 40 m de diámetro y una altura de 23,5 m, lo que da una cota respecto a rasante de 47 m, muy inferior a los 75 m originales. Se apoya sobre 12 nuevas columnas de hormigón coronadas por un anillo. Es por tanto una cúpula de un tamaño respetable; recordemos que el Panteón de Roma tiene una luz de 43,44 m.

El diseño de la estructura, figuras 344 y 345, en colaboración con la conocida ingeniería Leonhardt y Andrä, es impecable: un armazón de acero de 24 meridianos y 17 paralelos, sobre la que va apoyando el vidrio, rematado con un óculo abierto. Se forman con perfiles de sección quasi-triangular (muy interesante) y unión rígida, lo que evita las triangulaciones de los paños, figura 344. El comportamiento de la estructura es casi funicular, muy eficaz; mucho más que la antigua.

La cúpula tendrá una doble función. La primera de mirador, situado en una plataforma circular a una cota de unos 16 m sobre su base y de unos 15 m de diámetro. Al mirador se accede por un doble juego de rampas helicoidales de 1, 8 m de ancho (una de subida y otra de bajada), suspendidas de los meridianos por dos barras, figuras 344 y 345, y con una sección triangular que aporta la inercia a torsión que requiere la excentricidad de su apoyo. Es un diseño muy sugestivo, y la doble rampa funciona muy bien.

La segunda función de la cúpula es, como en su origen, iluminar la sala de plenos. Para mejorar esta función cuelga una especie de cono invertido forrado de espejos que asoma a dicha sala, figura 343. En mi opinión, y con toda la admiración que tengo por Foster, creo que esa parte de la obra es muy poco afortunada.

El arqutiecto, asumiendo la decisión del cliente de hacer una cúpula transparente, plantea un diseño muy interesante. Añade la función de mirador, con toda lógica, creando un magnífico doble sistema de rampas helicoidales voladas. Y, junto con Leonhardt y Andrä, diseñan una estructura de enorme rigor y limpieza. Todo ello es muestra de un gran oficio por ambas partes. Nadie imaginaría su historia, ni los motivos tan dispares que llevaron a la antigua y a la nueva cúpula a ser construidas con acero y vidrio.

La estructura no llega a ser la protagonista de la obra, que nace desde el deseo de añadir transparencia. Pero el acierto de su diseño es lo que da calidad a una obra donde casi todo es estructura. Y, por tanto, tiene un papel secundario de lujo, de los que anulan al protagonista.

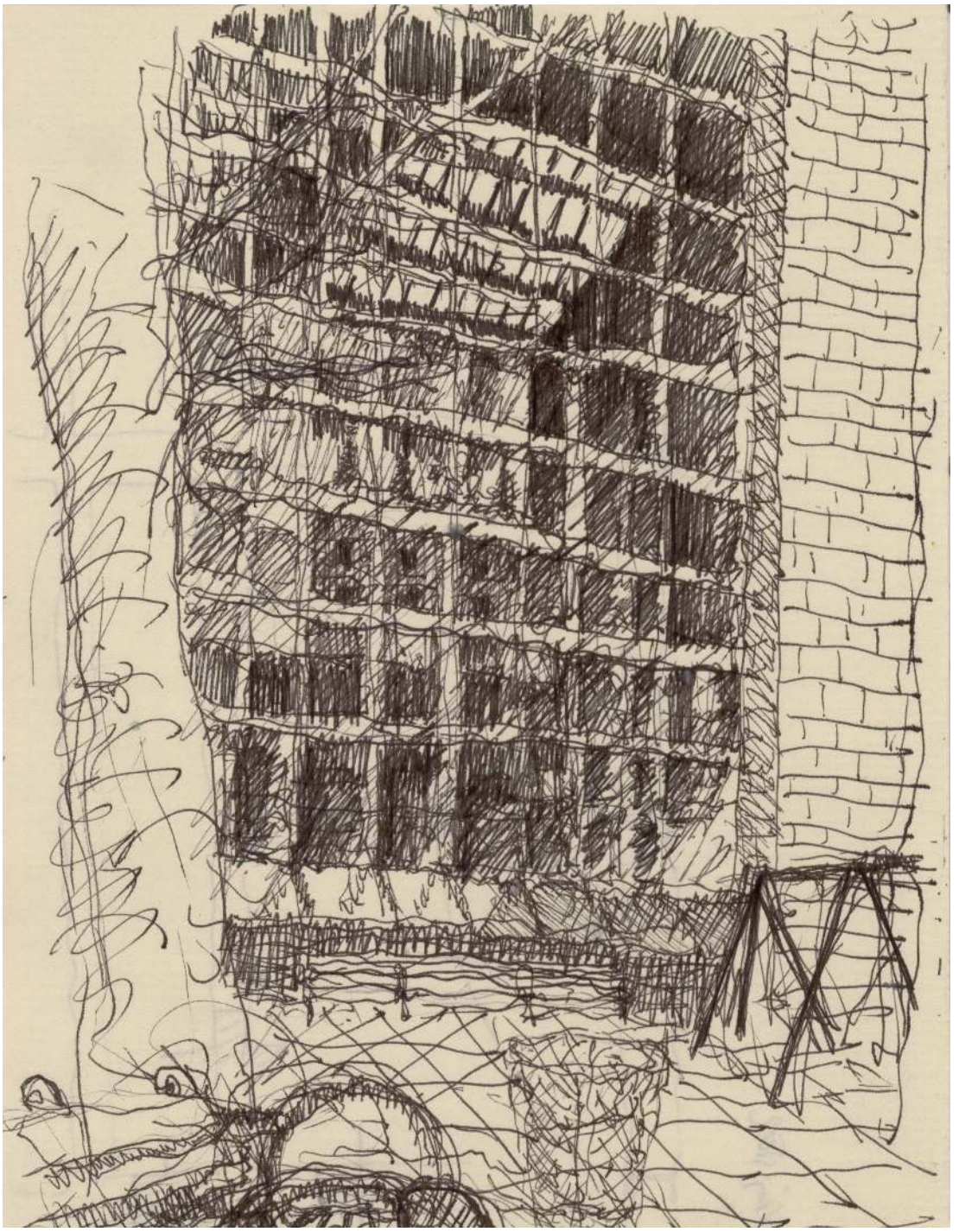


Figura 346: La Fundación Ford de Nueva York. *The Ford Foundation, New York*

Fundación Ford de Nueva York

**The Ford Foundation, New York:
Roche and Dinkeloo in complete synergy.**

The Ford Foundation, New York (1963–1968), figura 346, is by the architect Kevin Roche and the engineer John Dinkeloo, who at the time headed the Eero Saarinen company. It is located very close to the United Nations building on a privileged site. At the time and now too, office buildings try to make maximum use of space. The fact that this was for a foundation meant that Roche could prepare his design without this drawback, and he did so masterfully. He created a large garden atrium over which he placed the office space. The atrium is surrounded by the building's facade, which is very reasonable in New York. The exterior takes the form of a powerful prismatic building. On the inside, the offices enjoy their own atmosphere, one that has little to do with the noisy streets of Manhattan. The garden, which was designed by Dan Kiley, can be visited during office hours; it is therefore used as a small park in a city which needs more of them. This basic concept is brilliant, but it was resolved no less ingeniously; that is where Dinkeloo came in.
The offices occupy the whole upper part of the building, helping to create the image of a compact prismatic building rather than an L-shaped construction with the addition of a covered patio. For the same reason the stairs of the facades are covered, forming powerful buttresses that structurally offer a strong centre of turning against the problem of warping. Architecture and structure thereby become symbiotic. The patio is covered by trusses that rest on new interior supports with a reduced cross-section in spite of their height, thanks to their connection to the L-shaped part and the corner buttress of the facade. The structure of this lightwell is fantastic, and it stems from the breakdown of the truss diagonals. All of this is done with constructive simplicity and logic, as well as great beauty. The two large glazed walls that form the facade of the atrium are supported by strong horizontal beams which rest on the buttresses. This is a logical structural decision, given that this is not only the shortest span but also leads to fewer constructive problems. And moreover, this horizontal solution emphasises the primary vertical direction of the buttresses. The new use of weathering steel here is one of the key elements in the image of this building, to which the facade of the Banco de Bilbao by Oíza owes a lot. Structure here supports the project and is a part of it, without seeking independent expression and in symbiosis with the architecture. This is a great work of architecture with a magnificent structural design

**La Fundación Ford de Nueva York:
Roche y Dinkeloo en plena sinergia.**

La Fundación Ford de Nueva York (1963–1968), figura 346, es obra del arquitecto Kevin Roche y del ingeniero John Dinkeloo, al mando entonces de la firma Eero Saarinen. El edificio está situado muy cerca de Naciones Unidas, una ubicación privilegiada.
En aquel momento, y todavía ahora, el edificio de oficinas respondía a criterios de máximo aprovechamiento. El uso como fundación permite a Roche afrontar el encargo sin ese lastre. Y lo hace de forma magistral. Crea un gran atrio ajardinado sobre el que se vuelca el espacio de oficinas. El atrio queda envuelto por la fachada del edificio, algo muy razonable tratándose de Nueva York.
Al exterior se forma un potente volumen prismático. Al interior, las oficinas disfrutan de un ambiente propio que tiene poco que ver con las ruidosas calles de Manhattan. El jardín, diseñado por Dan Kiley, es visitable durante el horario laboral; y se convierte en un pequeño parque más en una ciudad necesitada de ellos.
Si ese punto de partida es brillante, su resolución no lo es menos; y ahí es donde Dinkeloo entrará en juego.
Las oficinas ocupan toda una banda superior de la planta, colaborando a la imagen de edificio prismático compacto y no edificio en L al que se añade un patio cubierto. Por lo mismo, las escaleras de las fachadas se envuelven formando machones potentes, que estructuralmente ofrecen un potente radio de giro frente al problema del pandeo. Es decir, arquitectura y estructura entran en simbiosis.
El patio se cubre con cerchas apoyadas sobre nuevos soportes interiores, cuya sección se puede reducir, a pesar de la altura, gracias al atado sobre la parte en L y sobre el machón de fachada de esquina. La estructura de ese lucernario es fantástica, nace ligada al despiece de las diagonales de la cercha. Todo ello resuelto con sencillez y lógica constructiva y, al mismo, tiempo con gran belleza. Las dos grandes cristaleras que cierran el atrio en fachada apoyan en fuertes vigas horizontales soportadas por los machones. Esa es la decisión estructural lógica, ya que, además de ser la luz más corta, plantea menores problemas constructivos. Pero, además, la horizontalidad realza la verticalidad y sentido estructural primario de los machones. El uso novedoso de acero *cor-ten* será uno de los elementos clave de la imagen del edificio. La fachada del Banco de Bilbao de Oíza debe mucho a esta obra. La estructura apoya al proyecto, se integra con él, sin tratar de expresarse de forma independiente, en simbiosis con la arquitectura. Es un gran proyecto de arquitectura con un magnifico diseño de estructura.

Figura 347: Cubierta del patio del British Museum. *Patio roof of British Museum.*

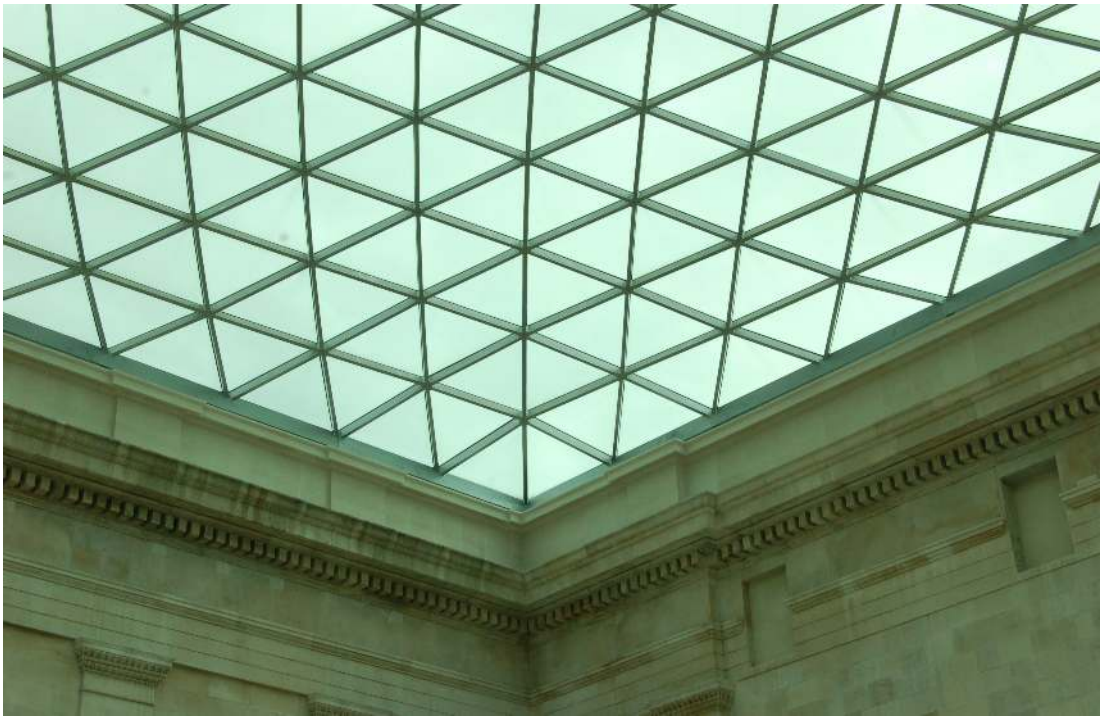


Figura 348: Detalle de esquina. *Detail of a corner.*

Cubierta del Patio del British Museum

**The British Museum patio roof:
a serene modern addition with a carefully designed structure.**

The renovation and reform of the Great Patio of the British Museum (1994-2000), figure 347, is by the architect Norman Foster and the structural engineering company Buro Happold. The engineer and researcher Dr. Chris J K Williams of Bath University also helped, (see Williams, 2001), as he developed the specific software required for the form-finding of the roof, which uses the well-known method of dynamic relaxation.

The patio measures 73 m east to west and 97 m north to south. The reading room is almost in the exact centre, displaced 3 m northwards, and it has a circular floor plan 44 m in diameter. The new roof covers this patio, so that its longest span measures 29.5 m to the south facade. It spans 23.5 m to the north and 14.5 m to the east and west. The structure consists of a single layer, which is quite an achievement for the spans in question.

The basic structure is triangular, making it possible for the glass to be flat while making the structure very rigid. The thick steel members vary in width depending on the forces they are subjected to.

This triangulation could have behaved in a funicular way; but except for the corners, which are braced, no horizontal forces could be accepted, implying a completely vertical force.

To improve this external trusses were added at the corners which cannot be seen from the patio. The bands that run to the corners of the rectangle therefore function as primary arches.

Figure 348 shows the corner of the rectangle where it meets the wall and how a member reaches the corner. This means that no quadrilaterals are used, only triangles, and moreover this is what the structure demands.

The desired connectivity of the mesh is firstly planned in horizontal projection using highly intuitive criteria, and then the definitive position is selected using the dynamic relaxation method.

This project adds to a historic building in a way that is free of complexes, covering the patio almost as if this had been designed beforehand, but in a way that is clearly modern.

The role of structure here, and more specifically the geometry and form-finding, is fundamental; but it is always included within the architectural project. This is a magnificent addition.

**Cubierta del Patio del British Museum:
una intervención serena y moderna con una estructura diseñada con esmero.**

La rehabilitación y reforma del Gran Patio del British Museum (1994-2000), figura 347, es obra del arquitecto Norman Foster y la ingeniería del estructuras Buro Happold. También colaboró el ingeniero e investigador Dr. Chris J. K. Williams de la Universidad de Bath (véase Williams, 2001), quién desarrolló un software específico para el *form-finding* de la cúpula, que usa el conocido método de la *relajación dinámica*.

El patio mide 73 m en dirección este-oeste y 97 m en dirección norte-sur. La sala de lectura ocupa un lugar casi centrado, desplazado 3 m hacia el norte, y tiene una planta circular de 44 m de diámetro. La nueva obra cubre ese patio, por lo que la luz máxima es de 29,5 m, hacia la fachada sur, de 23,5 m hacia la norte y de 14,5 m hacia este y oeste. La estructura está resuelta con una lámina de una sola capa, lo que no es considerable para esas luces. La lámina tiene un despiece triangular, que permite que los vidrios sean planos y conseguir una gran rigidez en la estructura. Las barras son gruesos chapones de acero, con canto variable según los esfuerzos.

La triangulación podría haber ofrecido un comportamiento funicular, pero salvo las esquinas, que quedan atirantadas, no se podían asumir empujes horizontales, lo que implica un esfuerzo laminar completo. Para mejorarlo se han añadido cerchas externas en las esquinas que quedan ocultas a la vista desde el patio. Las bandas que van hacia las esquinas del rectángulo actúan entonces como arcos primarios.

La figura 348 muestra el encuentro de esquina del rectángulo, y como un nervio acomete justo al vértice. Con ello se consigue que no aparezcan cuadriláteros, solo triángulos, y además es lo que demanda la estructura. La conectividad deseada de la malla se plantea primero en proyección horizontal, con criterios muy intuitivos. Luego se busca la posición definitiva por el método de la relajación dinámica.

El proyecto apuesta por una intervención en un edificio histórico sin complejos, que cubre el patio casi como si se tratase de una etapa diseñada ya antes, pero manifestando su modernidad. El papel de la estructura, y en concreto de la geometría y el *form–finding*, es fundamental; pero está siempre integrado en el proyecto de arquitectura. Es una magnífica intervención.

Figura 349: Vista general del centro de Tenis en Heimberg.
Tennis Centre in Heimberg, general exterior view.

Figura 350: Una estructura modular.
Modular structure.

Figura 351: Vista interior general.
General interior view.

Cubierta pista de tenis, Heimberg

Covered tennis court in Heimberg: *form–finding* with physical models.

Heimberg tennis centre (1978), Bern, Switzerland, figura 349, is by the architect J. A. Copeland and the engineer Heinz Isler. However, for those who know the past work of Isler, this is clearly a work he influenced strongly.

The roof is a reinforced concrete layer spanning 48 m; its thicknesses run from 30 cm at the base to 8 cm at the top. It is modular, with ribbed joints in each dip that improve stability, figure 350.

This shell is basically funicular. The form-finding used physical models, as do all of the shells in general designed by Isler from the end of the 1950s and which amounted to a true revolution.

The major shell designers of the time were restricted by having to use an analytic definition of the surface. Isler broke this chain and pioneered the design of free forms.

The engineer Julius Natterer said that to make a bridge another bridge is needed, due to the importance of having auxiliary resources.

Something similar occurs here, as to make a concrete shell a wooden one almost has to be built first.

Doing this in Switzerland in 1978 made far less sense than doing so in Mexico 10 or 20 years beforehand. In any case, the result is a spectacular structure.

The Swiss engineer Heinz Isler was able to short-circuit the problem of designing concrete shells by using physical models, at a time when their design was strongly restricted by mathematical considerations.

In 1959, in the first IASS Conference after its creation by Torroja, he presented a surprising paper entitled "New shapes for shells".

In this he surpassed masters such as Torroja, Nervi or Esquillian, who indisputably had more experience and scientific training (see Ramm and Schunck, 1986). This paradox should make us think.

What I consider to be less clear is how much sense it makes to play tennis under a low roof, above all almost completely without natural lighting, figure 351.

As sometimes happens, even though a structure is magnificent, it is not a part of a solid architectural project. In my humble opinion, of course.

Cubierta para pista de tenis en Heimberg: el *form–finding* con modelos físicos.

El Centro de Tenis en Heimberg (1978), Berna, Suiza, figura 349, es obra del arquitecto J. A. Copeland y del ingeniero Heinz Isler. Pero, para el que conozca la trayectoria de Isler, está claro que es una obra muy marcada por éste.

La cubierta es una lámina de hormigón armado de 48 m de luz; con espesores que van desde 30 cm en la base a 8 cm en la clave. Es modular, con juntas en cada valle, que tiene un resalto local para mejorar la estabilidad, figura 350. La lámina es, básicamente, funicular. El *form-finding* está hecho con modelos físicos, como en general todas las láminas diseñadas por Isler desde finales de los años 50, y que cuyo enfoque supuso una verdadera revolución. Los grandes diseñadores de láminas de entonces estaban atados por contar con una definición analítica de la superficie. Isler rompe esa traba y, de forma pionera, se adentra en el diseño de *formas libres*.

Dice el ingeniero Julius Natterer que, para construir un puente, hace falta otro puente, en relación a la importancia que pueden llegar a tener los medios auxiliares. En este caso sucede algo similar, para hacer una lámina de hormigón hace falta construir primero una lámina, o casi, de madera. Hacer eso en Suiza y en 1978 tiene mucho menos sentido que hacerlo en México 10 o 20 años antes. En todo caso, el resultado, como estructura, es espectacular. El ingeniero suizo Heinz Isler fue capaz de cortocircuitar el problema del diseño de láminas de hormigón mediante modelos físicos en un momento donde el aparato matemático limitaba mucho su diseño. En 1959, en el congreso fundacional del IASS, que creó Torroja, presenta una sorprendente ponencia de título "New shapes for shells". Y con ello adelanta a grandes maestros como Torroja, Nervi o Esquillian, que sin duda tenían una experiencia y, seguramente, una formación científica más sólida (véase Ramm y Schunck, 1986). Toda una paradoja que nos debe hacer reflexionar. Lo que está menos claro, en mi opinión, es el sentido que tiene jugar al tenis con una cubierta a una altura realmente justa y, sobre todo, sin casi iluminación natural, figura 351. Como a veces ocurre, la estructura, a pesar de ser magnífica, no está integrada en un proyecto sólido de arquitectura.

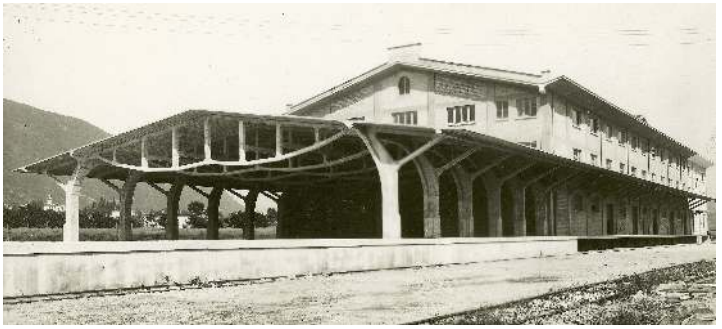


Figura 352: Vista exterior del almacén de aduanas en Chiasso.
Exterior view of the douane building in Chiasso.

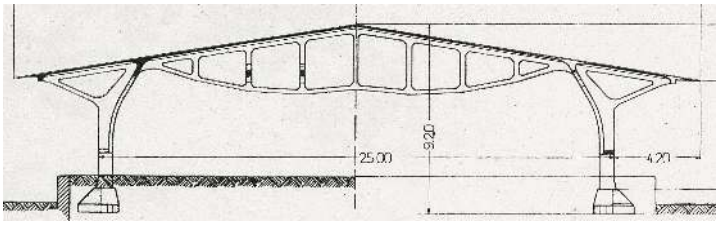


Figura 353: Alzado del pórtico.
Frame elevation.

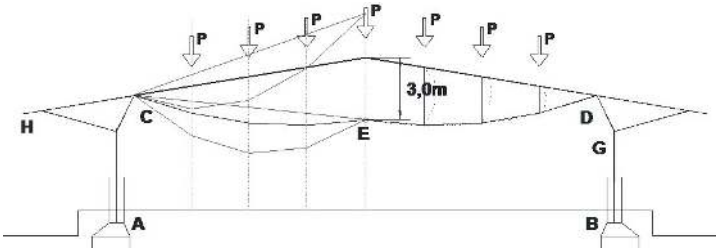


Figura 354: Diagrama funicular.
Funicular diagram.

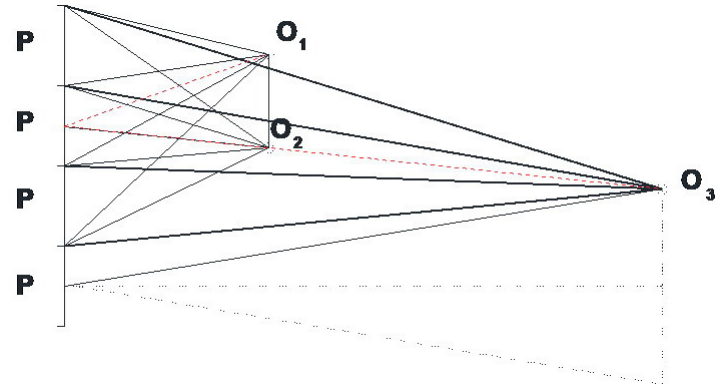


Figura 355: Diagrama de fuerzas.
Force diagram.

Almacén de aduanas en Chiasso

Chiasso Customs warehouse: rethinking the gable roof.

Chiasso customs warehouse (1924–25), Switzerland, figures 352 and 353, is by the engineer Robert Maillart.
Robert Maillart (1872–1940) is a key figure in structural design. Here we describe two of his most interesting works and inventions at Chiasso and Schwandbach. Another of his major contribution is the solid slab with capitals, which he proposed at the start of the 19th century at almost the same time as Claude Allen Porter Turner and Orlando Whitney Norcross in the U.S.A. Salginatobel bridge is one of his best-known works.
However, I like it less than I do these two works, because its impressive wooden frame by Richard Coray is a work of equal magnitude to the bridge itself (see Kessler, 1996). The building with the longest span displays one of Maillart's inventions; one of those ideas which, once seen, seem obvious although they are not. Each portico spans almost 25 m with two 4.2 m projections separated by a distance of 3.5 m. A solid slab approx. 15 cm thick rests on them. Between the porticos there strong tie-beams between several of their uprights.
For permanent loads and snow, which are the most influential ones, the pattern is funicular; the structure works only under traction and compression. We can understand it through it similarity to a moments graph, which for parallel loads has a funicular-like shape.
The geometry may also drawn using the graphic static, figures 354 and 355[a]. Null moment points C and are not arbitrary, but depend on the load accepted, which in this case is null (vertical reactions).
Non-symmetrical wind loads are shown with deflectors and cutters on the bars. A Vierendeel beam is clearly formed at the centre of the span.
This is a magnificent project with an innovative structure that arises from rethinking the structural solution for a gable roof. Pure Maillart.

[a] See Fernandez Cabo et al., 2014 and Zastavni, 2008

Almacén de aduanas en Chiasso: repensando la estructura de la cubierta a dos aguas.

El almacén de aduanas en Chiasso (1924–25), Suiza, figuras 352 y 353, es obra del ingeniero Robert Maillart (1872–1940), figura clave del diseño de estructuras. En este texto se comentan dos de sus obras más interesantes, Chiasso y Schwandbach, ambas grandes invenciones. Otra de sus grandes aportaciones es la losa maciza con capiteles, propuesta a comienzos del XX casi a la par por Claude Allen Porter Turner y Orlando Whitney Norcross en EE.UU.
El puente Salginatobel es uno de sus trabajos más conocidas. A mí me gusta menos que las anteriores, porque su impresionante cimbra de madera realizada por Richard Coray es una obra de la magnitud del propio puente (véase Kessler, 1996).
La nave de mayor luz muestra uno de los inventos de Maillart; de esas ideas que, una vez expuestas, parecen obvias sin serlo. Cada pórtico tiene una luz libre de casi 25 m y dos vuelos de 4,2 m, que están separados a una distancia de 3,5 m. Sobre ellos apoya una losa maciza de unos 15 cm de espesor. Entre pórticos hay unas potentes vigas de atado entre varios de sus montantes.
Para cargas permanentes y de nieve, las de mayor influencia, el trazado es funicular; la estructura funciona con sólo tracciones y compresiones. Podemos entenderlo por su semejanza con la gráfica de momentos, que para cargas paralelas tiene una forma afín al funicular. La geometría se puede trazar también con el uso de la estática gráfica, figuras 354 y 355[a]. Los puntos C y D, de momento nulo, no son arbitrarios, dependen del empuje asumido, que, en este caso, se ha hecho nulo (reacciones verticales). Para la acción de viento, no simétrica, aparecen además flectores y cortantes en las barras. En el centro del vano se forma una viga Vierendeel con toda claridad.
Es un magnífico proyecto con una estructura innovadora que surge repensando la solución de la estructura para la cubierta a dos aguas: Maillart en estado puro.

[a] véase Fernandez Cabo y col., 2014 para más detalles. También puede verse Zastavni, 2008

Figura 356: Vista del puente de Schwandbach.
View of the Schwandbach bridge.

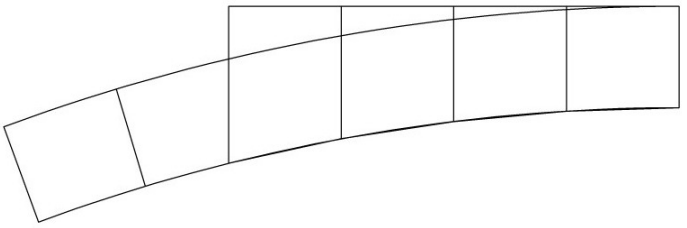


Figura 357: Esquema en planta de la mitad de la estructura.
Horizontal plan of half of the structure.

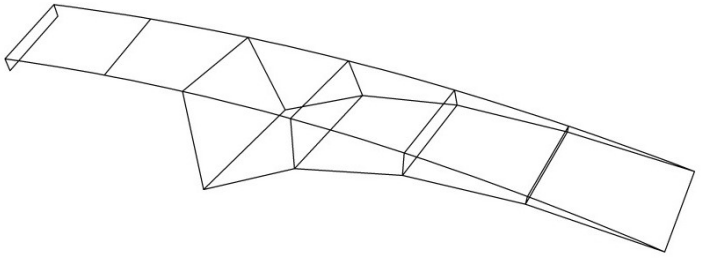


Figura 358: Esquema en perspectiva de media estructura.
Perspective diagram of half of the structure.

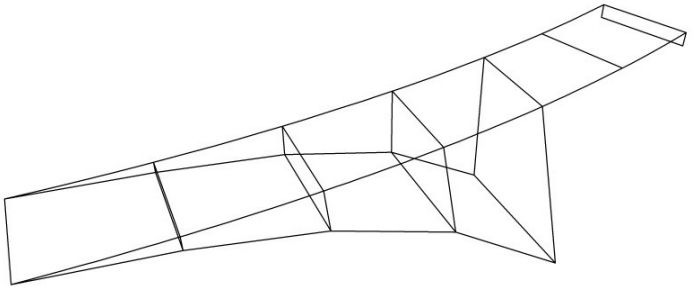


Figura 359: Esquema en perspectiva de media estructura.
Perspective diagram of half of the structure.

El puente de Schwandbach

Figura 360: Interior de la curva.
Intrados of the curve.

Schwandbach bridge:
an innovative design for a curved deck.

Schwandbach bridge (1933), Switzerland, figure 356, is by the engineer Robert Maillart.
It has a span of 37.4 m and a roadway only 3.6 m wide, with a projecting 1 m wide pavement on the right side. The weight limit of the bridge is 7 tonnes.
The curved deck has two side beams with 90 cm wide edges that stiffen the fine lower arch, which has an edge measuring only 20 cm wide and is funicular. This solution had already been tried by Maillart.
The newest thing here, although it had already been tried with variations in lesser works, (see Laffranchi and Marti, 1997), is how the curved deck determined by the route of the road is separated from the lower arch. Although the lower concave surface of the latter follows this curved route, its upper convex surface is perpendicular to the stream it crosses, figures 357 to 359. The curve is an ellipse. The arch is 4.2 m wide at the centre of its span and 6.36 m and 6.99 m at its ends.
Maillart did not then have an exact tool for analysing this structure, as could be expected. This is a new and brilliant idea. Another effective and beautiful invention by Maillart.

El puente de Schwandbach:
un diseño innovador para un tablero con trazado curvo.

El puente de Schwandbach (1933), Suiza, figura 356, es obra del ingeniero Robert Maillart.
Tiene una luz de 37,4 m, una calzada de sólo 3,6 m de ancho y una acera de 1 m a un lado anclada en voladizo. El límite de la sobrecarga es de 7 toneladas.
El tablero curvo tiene dos vigas laterales de 90 cm de canto que rigidizan el fino arco inferior, de sólo 20 cm de espesor, cuyo trazado es funicular. Es una solución ya ensayada por Maillart.
Lo más original, aunque ya lo había ensayado en obras menores, con alguna variante, (véase Laffranchi y Marti, 1997), es cómo separa el trazado curvo del tablero, que nace de la lógica del trazado de la carretera, del arco inferior, que en el intradós sigue esa trayectoria curva pero en el extradós es perpendicular al arroyo que salva, figuras 357 a 359. El trazado es elíptico. El ancho del arco es de 4,2 m en el centro del vano y de 6,36 m y 6,99 m en los arranques. Maillart no disponía entonces de una herramienta precisa para el análisis de esta estructura. No es nada raro. Es una idea nueva y brillante, otra eficiente y bella invención de Maillart.

Figura 361: Vista general del Eden Garden.
General view of Eden Garden.

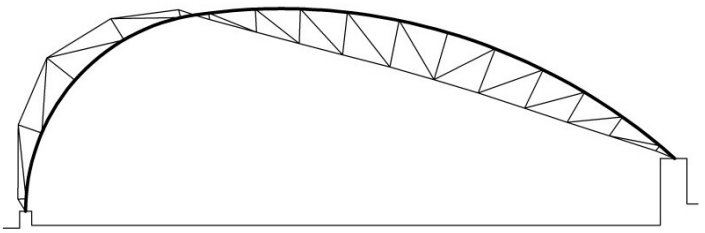


Figura 362: Esquema de la sección de la estación de Waterloo.
Diagram of the roof cross-section over the platforms of Waterloo station.

Figura 363: Exterior de la cubierta de la estación de Waterloo.
External view of the roof over the platforms of Waterloo station.

El *Eden Garden*

El *Eden Garden*:
soap bubbles.

The Eden Project (2001), Cornwall, figure 361, is by the architect Nicholas Grimshaw, with engineering by Anthony Hunt; and the MERO Company also worked on the engineering.
This project was individually promoted by Tim Smit. It started without any finance and solely with willpower. The location selected was a kaolinite pit that had closed in 1997 after being worked for a century; it had left a crater measuring about 50 hectares on a plain very close to the Cornish coast.
The aim was to make a sort of new version of Kew Gardens, showing the biodiversity of our planet. Without going into detail, this is an enormous greenhouse that contains different levels of humidity and temperature in different areas.
What would you do if somebody suggested developing a major project which, for the present time, had no funding whatsoever? Grimshaw basically reused the work on the renovation and expansion of Waterloo Station in London (1991–93), figures 362 and 363.
He had already worked together with Hunt on Waterloo Station, when Hunt had proposed a main structure with lowered arches with two centres spanning 32.7 m and 48.5 m, with variable width edges to adapt to local moment graphs, figura 362. This structure is ingenious and attractive, figura 363, it was in tune with the high tech movement that was especially active then in Great Britain.

El *Eden Garden*:
pompas de jabón.

El *Eden Garden* (2001), en Cornualles, Reino Unido, figura 361, es obra del arquitecto Nicholas Grimshaw y la ingeniería de Anthony Hunt, con la colaboración de la ingeniería de la empresa MERO.
El proyecto lo impulsa, de forma individual, Tim Smit. Arranca sin fondos, solo con voluntad. El lugar elegido es para su implantación es una cantera de caolín cerrada en 1997 después de un siglo de funcionamiento, lo que había dejado un cráter de unas 50 hectáreas en una planicie muy cercana a la costa de Cornualles.
La idea que se persigue es erigir un gran jardín botánico, unos nuevos *Kew Gardens*, que muestren la biodiversidad de nuestro planeta. Es decir, en trazos gruesos, se trata de construir un gran invernadero que debe contener ámbitos de humedad y temperatura distintos según el área.
¿Qué harían ustedes si alguien les propone desarrollar un proyecto de gran envergadura pero para el que no hay, en ese momento, fondo alguno? Lo que hace Grimshaw es, básicamente, reaprovechar lo realizado en la reforma y ampliación de la Estación de Waterloo de Londres (1991–93), figuras 362 y 363.
Él ya había colaborado con Hunt en ese proyecto, quién planteó una estructura principal con arcos rebajados de dos centros, con luces de 32,7 m a 48,5 m, que tienen un canto variable adaptado a la gráfica de momentos locales, figura 362. Es una estructura ingeniosa y atractiva, figura 363, en sintonía con el movimiento *High Tech* especialmente activo entonces en Gran Bretaña.

Figura 364: Arcos de intersección de las cúpulas.
Intersecting arches in the domes.

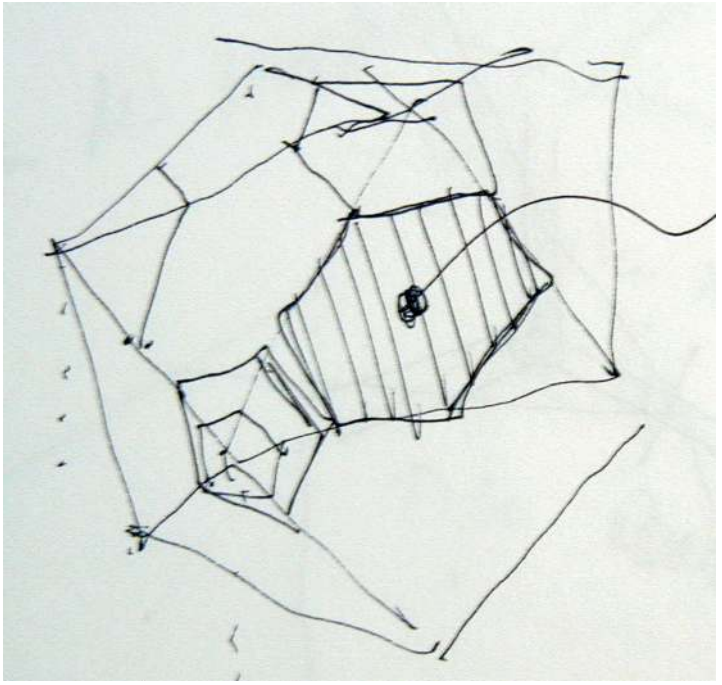


Figura 365: Esquema de despiece de la esfera con base en el icosaedro.
Breakdown of the sphere based on the icosahedron.

Figura 366: Cubierta de "pompas" de EFTE.
Cover with "bubles" of ETFE.

These arches, figure 362, are actually not very effective, because as the central articulation is very off-centre and the arch is lowered in its longest span, it basically functions as a beam supported at two points.
With this cross-section he proposed a project that looks like a worm. Among arches similar to those used in Waterloo Station there would be "cushions" made of translucent plastic. These really were a major change from the Waterloo project.
Once the project seemed to become economically viable there was a change of plan to the one that was eventually used: the idea, which had already been used by others, of a set of soap bubbles.
This was highly suitable for the needs and materials which would have to be used for the project.
The next decision was that the centres of the different spheres, which have different spans to adapt to the different hydrothermal atmospheres created, would all share the same horizontal plane.
This made it possible for the intersecting arches to be contained within vertical planes, figure 364, which is very reasonable.
The spherical domes tend to be broken down into icosahedrons, as I believe is done completely justifiably in figura 365. In this breakdown, the apexes are pentagons which reduce the span to a minimum, while between them there is a hexagonal surface that is subdivided into more hexagons with a maximum span of about 14 m.
The ETFE "bubbles" rest on these, figura 366. Unlike Kew Gardens, and completely logically, plastic is used here instead of glass.
The ETFE "bubbles" once again underline the initial project concept if a set if soap bubbles. Their structural use is highly logical, as they combine with a steel spatial mesh without producing thrust forces.
And they do so in a very suitable span, as we said about 14 m for the "cushion" as well as the dome. A high density of members is not clean in aesthetic terms, but it also reduces the axial force per member, which leads to oversizing for compression.
The first person to use this combination was, I believe, Kenzo Tange in the great mesh spanning 100 m using 10 m square "cushions" in the Osaka 1970 Expo. But here this technique is used in a dome.
The largest spans are about 110 m long, making it inevitable that the geodesic dome has a double layer, figures 367 and 368.

Esos arcos, figura 362, no son en realidad demasiado eficaces, porque al estar la articulación central muy descentrada y trateerse de un arco rebajado, la parte de mayor luz, la más tendida, trabaja básicamente como una viga biapoyada.
Con esa sección, Grimshaw propone un proyecto que parece una lombriz. Entre unos arcos similares a los de Waterloo irían apoyadas unas "almohadillas" de un plástico translúcido. Esto último era realmente el cambio más relevante respecto al proyecto de la estación de Waterloo.
Una vez que el proyecto parece económicamente viable, se da un giro hacia el rumbo que finalmente tiene: la idea, ya usada por otros, de un juego de pompas de jabón; muy compatible con las necesidades y materiales que demanda el proyecto.
La siguiente decisión es que los centros de las distintas esferas, con diferentes luces para adaptarse a la definición de ambientes higrotérmicos distintos, están situados en el mismo plano horizontal. Esto permite que los arcos de intersección estén contenidos en planos verticales, figura 364, algo muy razonable.
El despiece de las cúpulas esféricas suele realizarse con base en el icosaedro, como aquí se hace creo que con total acierto, figura 365. En los vértices de ese despiece aparecen pentágonos, que se van a reducir a una mínima luz, y, entre ellos, queda un paño hexagonal que se subdivide en más hexágonos con una luz máxima de unos 14 m, Sobre ellos apoyan las "pompas" hechas de ETFE, figura 366. Frente a los invernaderos de *Kew Gardens*, y con toda lógica, se sustituye vidrio por plástico.
Las "pompas" de ETFE vuelen a subrayar la idea inicial del proyecto de un juego de pompas de jabón. Su uso estructural es muy lógico, ya que se combina con una malla espacial de acero sin introducir empujes. Y lo hace, además, con una luz muy adecuada, como hemos dicho unos 14 m, tanto para la "almohadilla" como para la cúpula. Una fuerte densidad de barras no es limpia estéticamente, pero además reducen el axil por barra, lo que redunda en un sobredimensionado a compresión.
El primero en usar esta combinación fue, creo, Kenzo Tange en el gran emparrillado de 100 m de luz con "almohadillas" cuadradas de 10 m de lado diseñado para la Expo de 1970 de Osaka. Pero aquí se utiliza para una cúpula. Las luces mayores son de unos 110 m, lo que hace inevitable que la cúpula geodésica tenga doble capa, figuras 367 y 368.

Figura 367: Vista interior. *Interior view.*

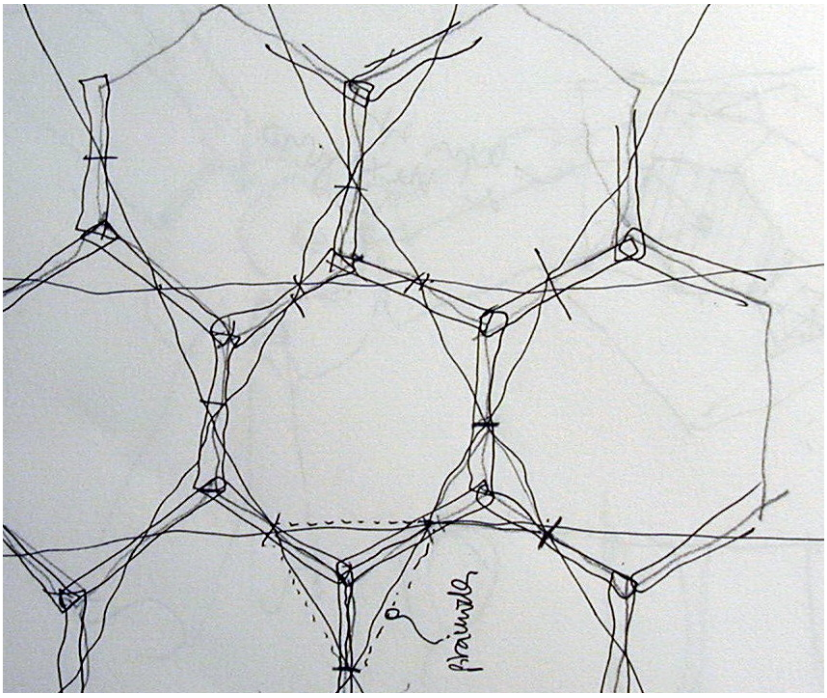


Figura 368: Esquema del despiece tipo, en ambas capas, del teselado hexagonal. *Diagram of a breakdown of the type, in both layers, in the hexagonal tessellate.*

Figura 369: Detalle de las uniones tipo en ambas capas.
Detail of the standard joints in both layers.

Es decir, se trata de un conjunto de cúpulas geodésicas de doble capa sobre las que apoya, con funciones de forjado y cerramiento, las pompas de ETFE. La capa exterior es más potente, pues se lleva las flexiones locales de las cargas ejercidas sobre el cerramiento; y la capa inferior es más fina, ya que su función principal es ayudar en la estabilidad. Ambas se unen por barras formando tetraedros, figura 369.

El despiece es magnífico, y no se llega a él desde el comienzo, como suele ser habitual. En el resultado de su diseño creo que tiene mucho que ver la ingeniería de MERO, la empresa que construye la estructura de acero, con una larga tradición en estructuras espaciales, uniones incluidas.

En la cúpula hay básicamente dos uniones, figura 369: La capa externa se une a través de una especie de cazoleta, hueca al exterior, de manera que se puede atornillar con comodidad. La capa interna se une con bolas macizas, un sistema más antiguo de MERO.

El punto más débil del proyecto, en mi opinión, es su proceso constructivo, ya que las cúpulas se montaron sobre un enorme andamiaje; por lo visto el mayor del mundo hasta la fecha. Pero no creo que eso sea algo de lo que presumir. Muchos tipos se han agotado o tenido que evolucionar para reducir el coste de los medios auxiliares.

Salvando ese punto, creo que es un proyecto y una estructura magníficos. La estructura es obviamente generadora, y su modulación y despiece están en la esencia de su éxito.

I.e., this is a set of double-layered geodesic domes over which the ETFE bubbles function as the roof and walls. The exterior layer is the strongest, as it withstands the local flexion forces of the loads on the roof; the lower layer is thinner, as its main function is to aid stability. They are joined by tetrahedron members, figure 369.

The analysis is magnificent, and I do not know whether it was reached from the first, as usually happens. I believe that this design has a lot to do with the MERO engineering company which built the steel structure, as it has a long tradition of using spatial members and joints.

There are basically two types of joint in the dome, figure 369. The external layer is joined using a type of clamp that is hollow on the outside, so that it can be conveniently bolted. The internal layer is joined using solid balls, an older MERO system.

I believe that the weakest point of this project is its constructive process, as the domes were erected over an enormous set of scaffolding, one that seems to have been the largest ever used to date in the world.

But I don't think that is anything to be proud of. Many types of structure have gone out of use or have had to evolve to reduce the cost of auxiliary equipment.

Apart from that point, I think that this is a magnificent project and structure. The structure here is clearly the source of the design, and its modulation and analysis are no less important, as they stand at the heart of its success.

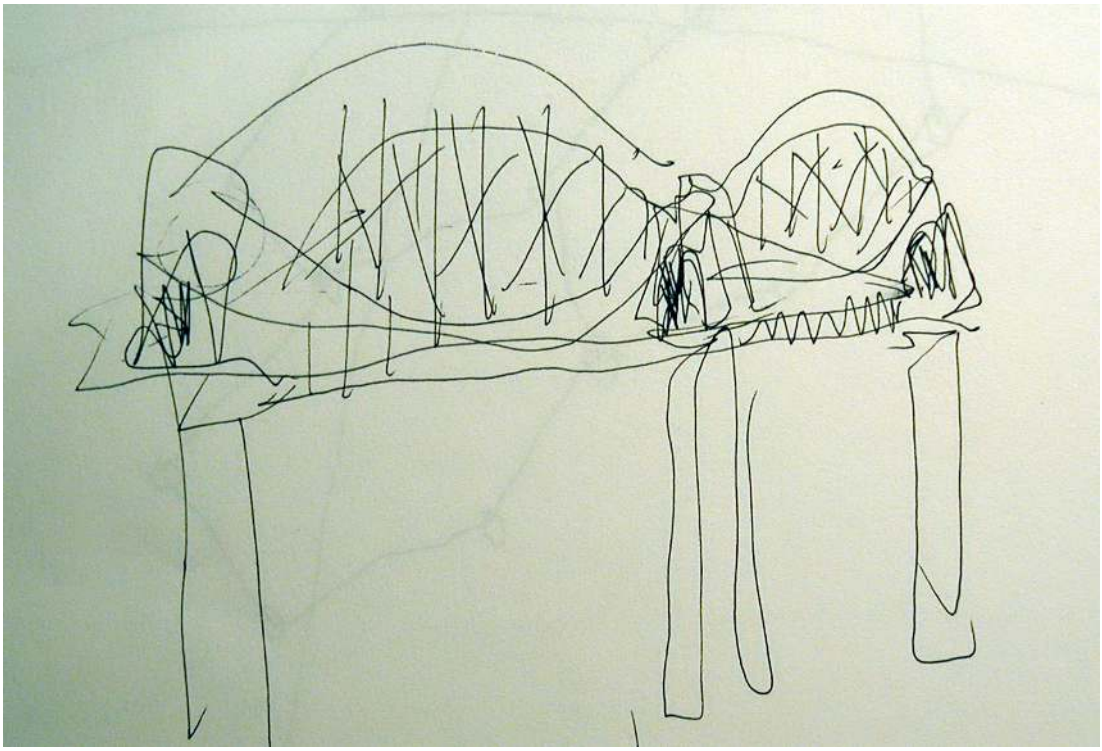


Figura 370: El Royal Albert bridge en Saltash. *The Royal Albert bridge in Saltash.*

Figura 371: Los puentes Royal Albert y Tamar en Saltash. *The Royal Albert and Tamar bridges in Saltash.*

El Royal Albert Bridge

The Royal Albert Bridge:
one of the great engineering achievements of the mid-19th century.

The Royal Albert Bridge (1848-59) in Saltash over the River Tamar, figures 370 and 372, for the Cornish Main Line railway, is the last work by Isambard Kingdom Brunel, who died that same year. First Telford and then Brunel led European engineering in practice, in spite of the fact that France was the leader in theory. Brunel combined English empiricism with an academic French education in the best Engineering Schools, he had also been educated by his father, an important engineer, in the first steps of his professional life.

Both of the main spans are resolved using lenticular wrought iron trusses. They are each 138.7 m long and have a slenderness of around 7, at a height of 30.5 m. The total length of the bridge is 666.8 m.

The new Tamar Bridge, figure 371, was finished in 1961. It has a central span of 335 m and lateral spans of 114 m; this is not very long for a suspension bridge, and this makes the truss that supports the deck important. Nowadays a cable-stayed bridge would probably have been built, which is better suited to these spans. But Brunel's bridge is cutting-edge engineering and it is beautiful, while the second bridge is, in my humble opinion, a far less outstanding work. Robert Stephenson, together with William Fairbairn and Eaton Hodgkinson, built the Conwy Bridge (1846-48), a hollow tube of wrought iron with a single span of 122 m and a slenderness of no less than 15.68; in 1899 this span would be reduced to 94.5 m (and we can imagine why).

All three went on to construct the Britannia Bridge a short time later (1846-50), using the same philosophy; a continuous wrought iron tube with two central spans of 140 m and two lateral spans of 70 m. The slenderness of the central sections is 15.38, while that of the lateral sections is 10. After time Stephenson himself described the design as flawed[a] however, it was, with the Conwy Bridge, a fine example of the use of wrought iron. Robert Stephenson had finished the superb High Level Bridge over the River Tyne at Newcastle in 1849; a bow-string bridge with two decks, the upper one for the railways and the lower hanging deck for road traffic.

[a] He did so when he saw the suspension-braced bridges by John A. Roebling in hte U.S.A.: the railway Niagara Bridge in 1855, with a span of 246 m; and the Cincinnati Bridge in 1866, with a span 330 m long. Stephenson said something like "if Roebling is right, then I am being foolish." What had happened was that the leadership in brdige construction had crossed the Atlantic ocean.

El Royal Albert Bridge:
un gran logro de la ingeniería de mitad del XIX

El Royal Albert Bridge (1848–59) en Saltash sobre el rio Tamar, figuras 370 y 372, para el ferrocarril del Cornish Main Line, es la última obra de Isambard Kingdom Brunel, que fallece ese mismo año.

Primero Telford y luego Brunel lideran la práctica de la ingeniería europea a pesar de que Francia era líder en teoría. Brunel conjuga el empirismo inglés con una educación académica francesa en las primeras Escuelas de Ingeniería, y el haber sido educado, en sus primeros pasos del ejercicio profesional, por su padre, un importante ingeniero. Las dos luces principales, resueltas con cerchas de tipo lenticular de hierro forjado, son de 138,7 m y una esbeltez de en torno a 7, con un gálibo de 30,5 m. Su longitud total es de 666,8 m.

El nuevo Tamar Bridge, figura 371, finalizado en 1961, tiene una luz central de 335 m y unas laterales de 114 m; lo que para un puente colgante es poca luz, de ahí la importancia de la cercha que soporta el tablero. Hoy día se haría, probablemente, un puente atirantado, más acorde para esas luces. Pero el de Brunel está en la ingeniería punta y es un bello puente, mientras que el segundo es, en mi opinión, un trabajo mucho más discreto.

Robert Stephenson, junto con William Fairbairn y Eaton Hodgkinson, construyó el Conwy Bridge (1846–48), un tubo hueco de hierro forjado con un único vano de 122 m de luz y una esbeltez de nada menos que 15,68; luz que en 1899 sería reducida a 94,5 m (podemos imaginar por qué).

Con esa filosofía, los tres construyen poco después el Britannia (1846–50), una viga en cajón continua de hierro forjado con dos vanos centrales de 140 m y dos laterales de 70 m. La esbeltez de los tramos centrales es de 15,38 y las de los laterales de 10. El diseño se desvelará con el tiempo, por el mismo Stephenson, como poco acertado[a]; pero que era, como el Conwy, un alarde en cuanto al uso de hierro forjado.

Robert Stephenson había terminado el soberbio High Level sobre el rio Tyne en Newcastle en 1849; un puente en arco atirantado (bow-string) con doble tablero, el superior para el ferrocarril y el inferior, colgado, para el tráfico rodado.

[a] Lo hace al ver los puentes colgantes-atirantados que estaba construyendo John A. Roebling en EE.UU.: los puentes de Niágara en 1855, de ferrocarril con una luz de 246 m; y el de Cincinnati en 1866, de 330 m de luz. Stephenson dijo algo así como "si Roebling tiene razón, yo estoy haciendo el tonto." Lo que sucedía era que el liderazgo de la construcción de puentes estaba cruzando el océano atlántico.

Figura 372: El Royal Albert Bridge en Saltash. *The Royal Albert Bridge at Saltash.*

Figura 373: Arranque del arco y unión con el tirante. *Arch and tie union.*

The arches are in cast iron and the beams of the deck, which functions as a tie, are in wrought iron. The longest span is 38.1 m long, and the slenderness of the arches is 7.3. With this precedent it is unclear why he used hollow tubes for longer spans. Using solid cores inevitably leads to over-sizing, and moreover tubular beams are very slender. However, reducing this would lead to wasting more material in the core, which made no sense.

Brunel used the idea of a gigantic tubular compression bowstring bridge, as he would do in Chepstow Railway Bridge in 1852, with a span 91 m long; it also has highly efficient overall geometry that is in fact better than that of the bridge at Saltash. This bridge cost half the amount of the Conwy Bridge, not because of its shorter span but due to its better design.

Figure : The Royal Albert Bridge at Saltash

Brunel almost equalled the spans of the Britannia Bridge, but with a more logical design; the lenticular truss of parabolic tied arches. The uprights are almost 22 m apart. The lower tie is composed of boom plates joined by pins (as Telford did over the Menai Strait). The deck is formed over wrought iron beams that hang from the tie. As in Chepstow Railway Bridge, a large tubular bowstring is used.

Brunel's design is doubtless better than the tubular beams used by Stephenson. Nevertheless, the slopes at the bases are rather low for optimum efficiency, figure 373, the slenderness of each parabolic truss is approx. 14. The general lines of the Chepstow Bridge are better.

The two large trusses were assembled on the shore before being shipped in barges and raised using jacks, the technique that Stephenson had used in the Britannia Bridge.

Why not use a braced arch bridge? Because with his tubular bowstring this was impossible, as it would have obstructed the railway line. But this route would have made it possible to use a better slope at the base and to use the deck as a brace. However, things were not so clear then.

The truth is that the Royal Albert Bridge is a formidable work that is worthy of Brunel's talent. It is a joy to see it still in use.

Analysis of this work is very important to gain an understanding of why in Paddington (see page 335).

Brunel is capable of working in fact as architect and engineer. Engineering had reached the peak of its social prestige, and it exemplified the *Zeitgeist*.

It should be underlined that Brunel continued to use wood, even though this was only for temporary purposes. Telford, who also constructed some works in this material, considered it to be a secondary material in comparison with the new iron.

Brunel was less drastic, and would create some magnificent works in wood (see Plugsley, 1976), even though he thought that iron was a stronger material. Paradoxes.

Los arcos eran de hierro fundido; las vigas del tablero, que hace de tirante, de hierro forjado. La luz máxima de 38,1 m, y la esbeltez de los arcos de 7,3. Con este precedente no se entiende bien su apuesta por los tubos huecos en luces mayores. El uso de almas macizas conduce, inevitablemente, a un sobredimensionado, pero, además, las vigas tubulares tenían una gran esbeltez. Pero el reducirla supondría más desperdicio de material en el alma. No tenía sentido.

Brunel usa la idea de un gigantesco cordón de compresión tubular, como haría en el Chepstow Railway Bridge en 1852, de 91 m de luz (que tiene, además, una geometría general muy eficiente; de hecho, mejor que el de Saltash). Este puente había costado la mitad que el Conwy Bridge, y no ya por su menor luz sino por un mejor diseño.

Brunel iguala aquí casi las luces del Britannia, pero con unas trazas más lógicas: la cercha lenticular de cordones con trazado parabólico. Los montantes están separados casi 22 m. El cordón inferior se forma con platabandas unidas por pasadores (como hizo Telford en el Menai). El tablero apoya sobre vigas de hierro forjado que cuelgan de la cercha. Al igual que en el Chepstow Railway Bridge, usa un cordón tubular de gran tamaño.

El diseño de Brunel es, sin duda, mejor que las vigas tubulares de Stephenson. No obstante, las pendientes de los arranques son algo bajas para una eficiencia óptima, figura 373; la esbeltez de cada cordón parabólico es de, aproximadamente, 14. Las trazas generales del Chepstow son mejores.

Las dos grandes cerchas se construyen en la orilla, se transportan en barcazas y se elevan con gatos, técnica usada por Stephenson en el Britannia

¿Por qué no utilizó un arco atirantado? Porque con su cordón tubular era imposible, interfería con la vía del ferrocarril. Pero ese camino le hubiera permitido tener una mejor pendiente en el arranque y el tablero como tirante. Pero la cosa no era, entonces, tan evidente.

La verdad es que el Royal Albert Bridge es una obra formidable, digna del talento de Brunel. Poder verla, todavía en uso, es un placer.

Analizar esta obra es muy conveniente para entender por qué en Paddington (véase la página 335) Brunel es capaz de asumir, de hecho, la doble condición de arquitecto e ingeniero. La ingeniería había alcanzado el culmen de su prestigio social; ejemplificaba el *Zeitgeist*.

Algo que merece la pena destacar de Brunel es como sigue usando la madera, aunque sea con una concepción de temporalidad. Telford, que tenía alguna obra interesante con este material, lo consideraba un material de segunda frente al nuevo hierro. Brunel será menos drástico, y hará obras en madera magníficas (véase Plugsley, 1976); aún pensando igualmente que el hierro era un material más potente. Paradojas.

Figura 374: La estación de Paddington, andenes. *Paddington station, platforms.*

Figura 375: Arranque de los arcos. *Bottom of arches.*

La estación de Paddington

**Paddington Station:
a transport cathedral.**

Paddington Station (1854), London, Londres, figures 374 and 375, is by the great engineer Isambard Kingdom Brunel and the architect Matthew Digby Wyatt; the latter worked on ornamenting Brunel's work (perhaps not too well). Paddington was the station of the powerful Great Western Railway (GWR) Company, for which Brunel was the main engineer.

It was built by Fox, Henderson and Co, who also built the Crystal Palace. The architect had also worked on the latter, and Brunel had publically expressed his admiration for it. But rather than being influenced in any specific way by the Crystal Palace, they both shared the fascination of the time for the new engineering.

The first and largest phase involved the construction of three large wrought iron parallel elliptical arches covering spans of 21.2 m, 31 m and 20.7 m, together with two lateral spans 15.24 m wide. A fourth large span was added from 1915 to 1916.

Corrugated iron purlins spanning about 3 m support the glass roof between the arches. The purlins perhaps could have been longer in span to save costs. However, with a reasonable modulation in economic terms, this narrow separation offers a far more interesting rhythm in aesthetic terms.

A beam at the head of the supports braces the work longitudinally, figure 375, this also support the two intermediate arches, clarifying movement along the platforms. Many of the supports were replaced in steel in work that finished in 1924. The building holding the lobby braces the side. In the second half of the 20th century there was a change and much was replaced by an opaque roof; this has undoubtedly altered the initial appearance of the work, and other renovation work took place in the 1990s.

This work still looks impressive, like a transport cathedral. This was no doubt the intention of the GWR when they ordered it, and nowadays it is state-owned. But these are works that, as was the case in the 19th century, go beyond their strictly utilitarian function. They are public spaces that work as introductions to the cities that hold them. Brunel met this dual function superbly.

The structure here is the protagonist. And even better, so is engineering, the star of the whole 19th century. And as occurred in the Crystal Palace, two new aesthetic paradigms emerge: lightness and transparency.

**La estación de Paddington:
una catedral del transporte.**

La estación de Paddington (1854), Londres, figuras 374 y 375, es obra del gran ingeniero Isambard Kingdom Brunel y del arquitecto Matthew Digby Wyatt, cuyo papel fue el de ornamentar lo que hacía Brunel (puede que sin demasiado acierto). Paddington era estación de la pujante compañía Great Western Railway (GWR), y Brunel su ingeniero de referencia.

La construye la empresa Fox, Henderson and Co, que levantó también el Crystal Palace (obra en la que estuvo también colaborando el arquitecto y que Brunel admiró públicamente). Pero, más que una influencia concreta de esa obra, ambas comparten la fascinación de la época por la nueva ingeniería.

La primera y mayor fase se construye con tres grandes vanos cubiertos con arcos elípticos paralelos de luces de 21,2 m, 31 m y 20,7 m de hierro forjado, más dos vanos laterales de 15,24 m. Entre 1915 y 16 se añade un cuarto gran vano. Entre arcos apoyan correas de hierro corrugado, con una luz de unos 3 m, y, sobre ellos, el cerramiento de vidrio. Las correas quizá podrían haber tenido algo más de luz para reducir el coste, pero, siendo una modulación razonable en lo económico, la pequeña separación ofrece un ritmo mucho más interesante desde el punto de vista estético. Una viga en cabeza de los soportes arriostra la obra en sentido longitudinal, figura 375, que, además, sirve de apoyo a dos arcos intermedios, aclarando la circulación en los andenes. Muchos soportes se reemplazan por acero en una obra que acaba en 1924. El edificio que alberga el vestíbulo arriostra en el sentido transversal. En la segunda mitad del siglo XX se modifica la cubierta y buena parte es sustituida por un cerramiento opaco; lo que sin duda alteró el aspecto inicial de la obra. En los 90 se acometen otras reformas.

El aspecto de la estación sigue siendo imponente: una catedral del transporte. Esa, sin duda, fue la voluntad de GWR al promoverla (hoy día es de propiedad pública). Son obras que, igual que en el XIX, van más allá de su estricta función utilitaria, son espacios colectivos que se convierten en carta de presentación de las ciudades que los acogen. Brunel atiende a esa doble función de manera soberbia. La estructura es protagonista. Más aún: la ingeniería, estrella en todo el siglo XIX. Y como en el Crystal Palace, se manifiestan dos nuevos paradigmas estéticos: ligereza y transparencia.

Figura 376: Vista exterior del Polydôme de Lausanne. *Exterior view of Lausanne Polydôme.*

Figura 377: Vista del interior. *Interior view.*

El Polydôme, Universidad de Lausanne

Lausanne University Polydôme: mechanically constructed ribbed wooden shell as the core element.

Lausanne University Polydôme (1991), figures 376 and 377, is by the engineer Julius Natterer and the architects Badic et Associes, Morges; but the engineer here is the key figure.
This building is used as an exhibition hall and for other similar purposes.
It consists of a ribbed wooden dome (of the type known in German as Holzrippenschale: ribbed wooden shell), with a ribbed wooden roof. It is one of a series made in the 1990s, together with the Ober-Ramstadt Polydôme of 1997 and the Triesen Polydôme of 1999. Others were later built by Natterer and others.
The shell is a sphere with a floor area of approximately 25 m×25 m and a maximum height of 6.8 m. The radius of the sphere is 27.5 m.
The ribs (Rippen) follow geodesic lines and are denser at the diagonals, figures 377 and 379. They are what differentiates this structural design.
Each rib is composed of a sheet joined by screws (not glue), plus a pin at the intersections, figure 378.
The solid wood panels linked by *finger-joints* overlap each other alternatively in each direction (two per direction); parts of panels are added to the resulting gaps so that the rib cross-section is solid. Although a slight loss of rigidity arises due to the type of joint, this system is quite efficient and uses an economical material.
There are metal parts at the base of the dome, figure 379, which in turn are anchored to others in the reinforced concrete that are joined to the foundations and brace the pressures.
Edge ribs are formed around the edge, figure 380, at the lineal edge of the surface as well as in a superficial strip that is stiffened by a type of truss formed in the plane of the dome.

El Polydôme de la Universidad de Lausanne: el nervio de laminado mecánico de madera como elemento nuclear.

El Polydôme de la Universidad de Lausanne (1991), figuras 376 y 377, es obra del ingeniero Julius Natterer y de los arquitectos Badic et Associes, Morges; si bien la figura clave es el primero. Su función es la de sala de exposiciones y actos varios.
Se trata de una cúpula nervada de madera (dentro del tipo llamado en alemán *Holzrippenschale*: láminas nervadas de madera), cuya plementería, a modo de forjado, también es de madera. Forma parte de una serie construida en los 90, junto con el Polydôme de Ober-Ramstadt de 1997 y el de Triesen de 1999; posteriormente se han realizado otras obras similares.
La envolvente es un casquete esférico con una planta de aproximadamente 25 m × 25 m y una altura máxima de 6,8 m. El radio de la esfera es de 27,5 m.
Los nervios (Rippen) siguen los círculos máximos, y son más densos en las diagonales, figuras 377 y 379. En ellos está el elemento diferencial del diseño estructural.
Cada nervio se forma por un laminado unido por tornillería (no por cola), más un pasador en las intersecciones, figura 378. Las tablas de madera enteriza, empalmadas por *finger–joints*, se solapan una sobre otra, alternativamente, en cada dirección (dos por dirección), y en los huecos generados se añaden trozos de tabla para que la sección del nervio sea maciza. Hay una pequeña pérdida de rigidez por el tipo de unión, pero es un sistema bastante eficiente y que emplea un material barato.
En los arranques de la cúpula aparecen piezas metálicas, figura 379, que se anclan, a su vez, en otros elementos de hormigón armado unidos a la cimentación, que equilibran los empujes. En el perímetro se forman unos nervios, figura 380, tanto en el límite lineal de la superficie como en una banda superficial que queda rigidizada por una especie de cercha que se adapta a la forma de la cúpula.

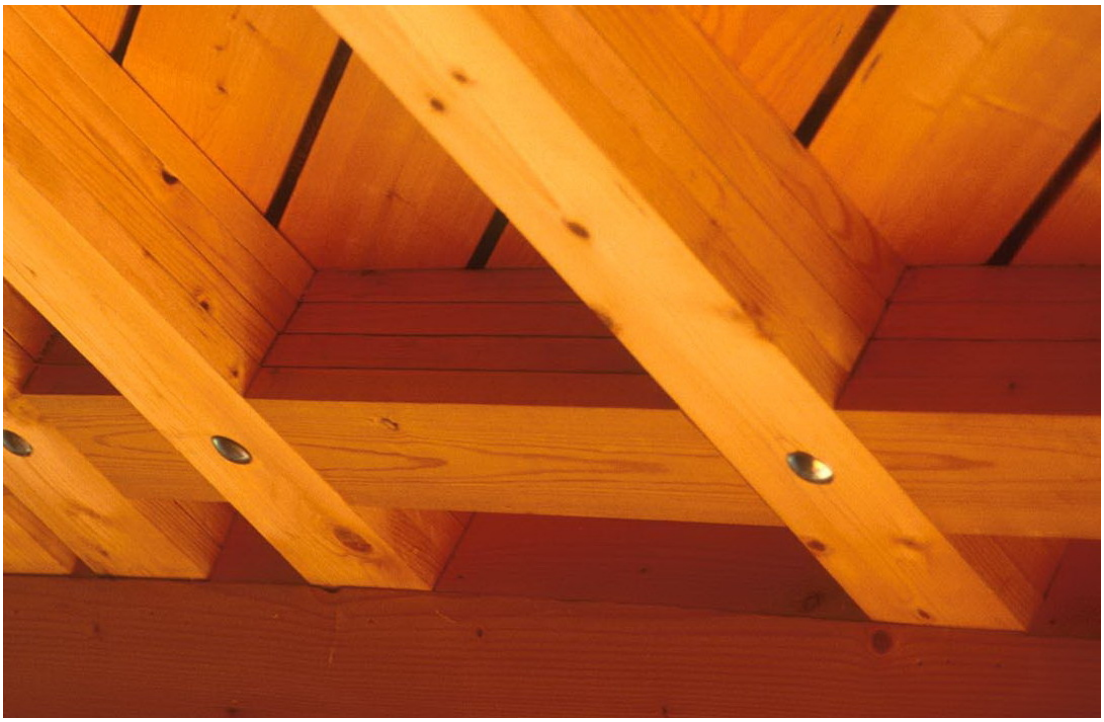


Figura 378: Detalle de las nevaduras de madera. *Detail of wooden ribs.*

Figura 379: Detalle del arranque de la cúpula. *Detail of the base of the dome.*

Figura 380: Vista de los nervios de borde.
View of edge ribs.

Rib technology is specific to wood, and this led to the concept of a ribbed dome with a roof of panels placed diagonally to the ribs, which apart from stiffening the surface function as the frame for the light roof made of sprayed insulation material and water-proof paint.
Why wasn't the glued laminate technique used, as it is structurally more effective? Because it complicates erection, and therefore raises the cost.
The choice of a mechanically constructed laminate is a very conscious decision and one that believe to have been correct in this case.
Four gaps were left for overhead illumination, and there are also vertical windows in the facades.
At the time this was an important work, above all because it showed the possibilities for using wood in structures. These relatively modest works were useful practice runs for other more ambitious projects such as the EXPO-Dach shell (see page 341).
From an architectural point of view I believe this to be a more modest work, although it is correct. Although its engineering and architecture are integrated, the second here has adopted a role that is too passive, as if good technique were enough to ensure the success of the project.
This is evident above all in the roof and treatment of the glass facades; at least that is my personal feeling.

La tecnología de los nervios es específica de la madera, y de ahí también nace el planteamiento de cúpula nervada, con una plementería de tablas, colocadas en diagonal respecto a los nervios, que además de rigidizar la superficie hacen de forjado para el cerramiento ligero, que se compone de un aislante proyectado y una pintura impermeable. ¿Por qué no se ha recurrido a la técnica del laminado encolado, que estructuralmente es más eficaz? Porque complica el montaje, y encarece la obra. La elección del laminado mecánico es una decisión muy consciente y, en este caso, acertada. Se han dejado cuatro huecos para iluminación cenital, a los que hay que sumar los ventanales verticales de las fachadas.
En su momento fue una obra importante, sobre todo porque recordaba las posibilidades que tenía la madera en el campo estructural. Estas obras, relativamente modestas, han servido de ensayo para otras más ambiciosas, como las láminas de la EXPO-Dach (véase la página 341).
Desde el punto de vista arquitectónico creo que es una obra más humilde, aunque correcta. Hay integración entre ingeniería y arquitectura, pero seguramente la segunda ha adoptado un papel demasiado pasivo, como si una buena técnica bastase para el éxito del proyecto. Eso resulta evidente en el cerramiento de cubierta y el tratamiento de las fachadas de vidrio.

Figura 381: Vista general de la EXPO-Dach. *General view of the EXPO-Dach.*

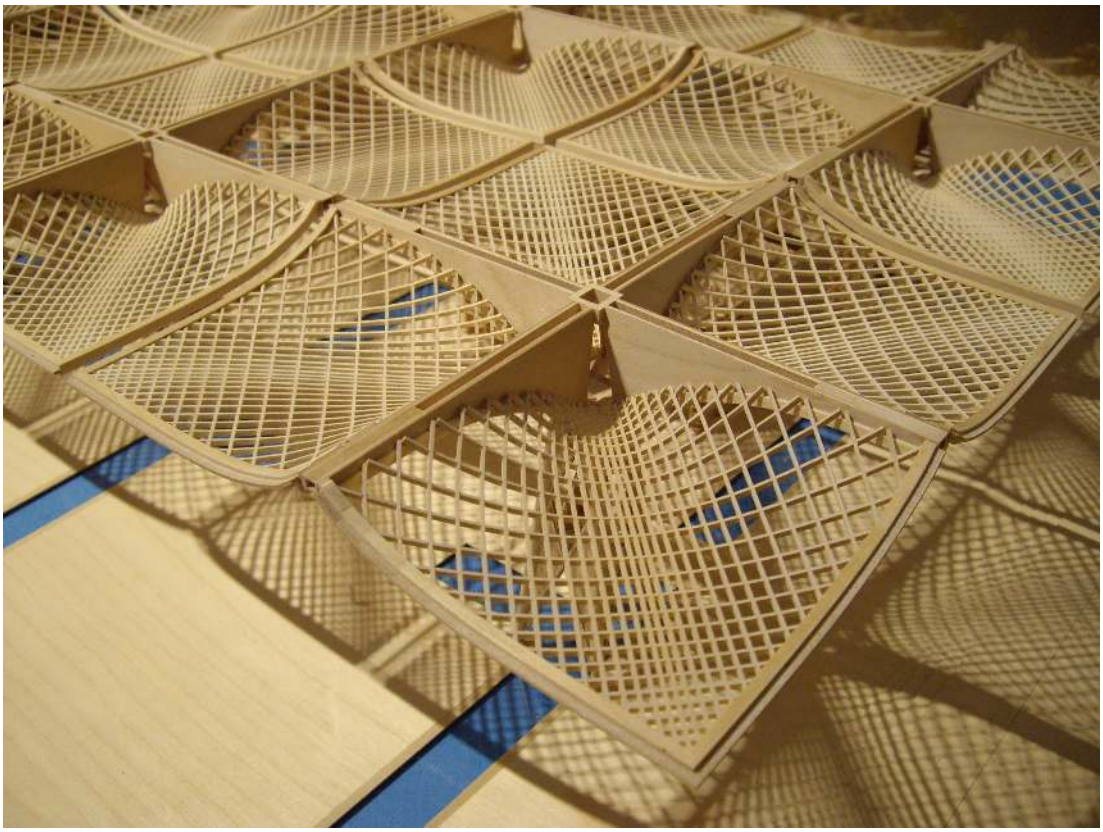


Figura 382: Maqueta del proyecto, con dos módulos más de los ejecutados. *Model with two extra modules.*

EXPO–Dach de Hannover

Hannover EXPO-2000 EXPO–Dach: a great wooden protective roof.

Hannover EXPO-2000 EXPO–Dach, figures 381 and 383, is a work that was led by architect Thomas Herzog and Julius Natterer, the engineer.
The theme of EXPO-2000 was: Human Beings-Nature-Technology. The EXPO-Dach was the physical icon of the EXPO, and it therefore attempted to reflect these three aspects of the theme.
This project considers the roof to be a paradigm for the protective nature of architecture.
The use of wood links this to nature. And of course, this pavilion is an example of the extremely high technological level of construction using wood in Germany, as well as the high performance of this material (which is often forgotten).
The roof is topped by a translucent white membrane which filters the light through the wooden mesh. This is important as the space underneath is conceived to be a large area for meetings and different activities.
This project has a rectangular but irregular pattern, figure 381, with two lines of four modules plus two more: a 3×4 matrix from which two modules have been eliminated from one long side. The original project had two more modules, figure 382.
Each module is a 40 m×40 m square composed of pillars-supports and large umbrellas projecting out 19 m; leaving small gaps between the umbrellas covered by skylights.
This is the same module that was used by Nervi in the *Palazzo del Lavoro* (see page 133); this means that this project starts off on the right foot. And these are projecting structures, too, designed in principle to be independent.
Each tower is anchored to four vertical piles from 10 m to 15 m deep, over which a cap is constructed.
As well as the reinforced concrete of the foundations, steel is used for the edges and joints, together with five types of structural wood: large dimension solid wood cylinders, sawn solid wood in different sizes, glued laminated wood (GL) and microlaminated wood (LVL).

La EXPO–Dach de la EXPO–2000 de Hannover: un gran techo protector de madera.

La EXPO–Dach de la EXPO–2000 de Hannover, figuras 381 a 383, es una obra liderada por el arquitecto Thomas Herzog y el ingeniero Julius Natterer.
El lema de la EXPO–2000 fue: *El Ser Humano–Naturaleza–Tecnología*. La EXPO-Dach fue emblema físico de la EXPO, y, por tanto, trataba de reflejar esos tres vértices del lema.
El proyecto considera la cubierta como paradigma del carácter protector de la arquitectura. El uso de la madera enlaza con la naturaleza. Y desde luego, el pabellón es muestra del altísimo nivel tecnológico que la construcción con madera tiene en Alemania; además de las grandes prestaciones del material (algo tantas veces olvidado).
El cerramiento de la cubierta es una membrana blanca traslúcida que filtra la luz entre la trama de madera. Es una cuestión importante, pues el espacio bajo ella se concibe como gran plaza de reunión y de celebración de actos diversos. El proyecto está organizado como una trama rectangular irregular, figura 381, con dos tiras de cuatro módulos más otros dos: una matriz de 3 × 4 a la que se le quitan dos módulos en un borde largo. El proyecto inicial incluía dos módulos más, figura 382.
Cada módulo es un cuadrado de 40 m × 40 m, que se forma con soportes–torre y grandes paraguas con un vuelo de 19 m, quedando unas pequeñas bandas entre paraguas que se cubren con lucernarios. Es el mismo módulo que usa Nervi en el *Palazzo del Lavoro* (véase la página 133), lo que es empezar con buen pie. Y son también estructuras en voladizo, en principio concebidas como autónomas.
Cada torre se ancla a cuatro pilotes verticales de 10 m a 15 m de profundidad, sobre los que se construye un encepado. Además del hormigón armado de la cimentación, se emplea acero en remates y uniones y cuatro tipos de madera estructural: madera enteriza en rollo de grandes dimensiones, madera enteriza escuadrada de distintas medidas, madera laminada encolada (GL) y madera microlaminada (LVL).

Figura 383: Vista inferior. *View from below.*

Each tower, figures 383 to 386, is composed of four supports at the corners tied by strips of LVL that eventually triangulate the whole set. At the centre the large drainage gutter can be seen.
Each corner support arises from a large metal base, figure 384, which is logical to prevent rotting. A large wooden cylinder cut in half and then rejoined is formed. This is to prevent cracking due to drying, and it also makes it easier to connect it to other elements.
Each trunk was expressly selected in the forest and checked using non-destructive techniques once it had been cut down and cut into two halves. Sawing wooden trunks weakens them, as fibres are cut. This is not a design decision, although the conical shape of the trunk is perfect for the corners of the towers.
The blind strips between the trunks are composed of LVL and local laminated sawn wood reinforcements together with steel members, figures 384 and 385. Note how the joints contain metal elements, something which seems to be inevitable nowadays.
The corbels and towers are joined by large metal parts, figure 386. There is no other sensible way of doing this, and moreover this change of material creates a capital.
The next structural order is composed of four boxed section corbel trusses balanced two by two, figures 382, 386 and 387. They project about 19 m and are a total of 2.9 m wide with a 7 m edge, i.e., a slenderness of 2.7 m. Some parts such as the towers are hybrid, as they are composed of several elements. Large sections of GL are used in the booms (two sections measuring 100 cm × 22 cm in the upper one and two others up to 145 cm × 22 cm in the lower one), while LVL is used in the cores together with local GL and steel reinforcements. The upper boom, which is under traction, is post-stressed to its own weight, which is very logical.
A grid of four panels rests on the corbels, figure 387. It is funicular in form for its own weight, of about 100 kN/m (which is not trivial). *Form-finding* techniques were used for the pattern, setting its passage over the corbels and the total edge that was desired. Although this is not a hyperbolic paraboloid, it is very similar to one in how it works. One of the directions in the pattern, the one that reaches the towers, works under compression, while the perpendicular one works under traction. The distances between the members vary from 0.5 m to 1.5 m, as they are denser in the compression zones and close to the edge ribs subjected to the greatest forces.

Cada torre, figuras 383 a 386, está compuesta por cuatro soportes en esquina atados por paños de LVL que acaban triangulando el conjunto. En el centro se puede ver el gran canalón de desagüe.
Cada soporte de esquina arranca en una gran basa metálica, figura 384, algo lógico para evitar pudriciones. Se forma con una gran pieza de madera en rollo cortada en dos mitades y vuelta a unir. Esto se hace para evitar grietas por secado, y así se facilita la unión con otros elementos. Cada tronco ha sido expresamente seleccionado en el bosque y comprobado, con técnicas no destructivas, una vez apeado y cortado en dos mitades. Al escuadrar la madera en rollo se reduce la resistencia, ya que se cortan fibras. No es una elección meramente formal, aunque su apariencia troncocónica es perfecta para las esquinas de las torres. Los paños ciegos entre rollizos se realizan con LVL y refuerzos locales de madera aserrada y laminada y barras de acero, figuras 384 y 385. Nótese cómo en las uniones aparecen elementos metálicos, algo hoy por hoy inevitable.
La unión entre ménsulas y torres se produce mediante grandes piezas metálicas, figura 386. No hay otra forma sensata de hacerlo, y además ese cambio de material crea un capitel.
El siguiente orden estructural lo forman cuatro cerchas en ménsula de sección en cajón equilibradas dos a dos, figuras 382, 386 y 387. Tienen unos 19 m de vuelo, un ancho total de 2,9 m y un canto de 7 m, es decir, una esbeltez de 2,7 m. Son piezas, como las torres, híbridas, compuestas por varios elementos. En los cordones se usan grandes secciones de GL (dos secciones de 100 cm × 22 cm en el superior y otras dos de hasta 145 cm × 22 cm en el inferior), y en las almas se emplea LVL y refuerzos locales de GL y acero. El cordón superior, en tracción, se postesa a peso propio, algo muy lógico.
Sobre las ménsulas apoyan cuatro láminas en trama, figura 387. Su forma es funicular para el peso propio, de unos 10 kN/m^2 (no es poca cosa). Para el trazado se han usado técnicas de *form-finding*, fijando su paso por las ménsulas y el canto total deseado. No es un paraboloide hiperbólico, pero en su manera de trabajar sí hay una gran similitud. Una de las direcciones de la trama, la que llega a las torres, trabaja en compresión, y la perpendicular en tracción. Las distancias entre barras son variables, de 0,5 m a 1,5 m, más denso en la zona de compresiones y cerca de las zonas de los nervios de borde más solicitadas.

Figura 384: Detalle de las torre–soporte exteriores. *Detail of the exterior tower-supports.*

Note how the mesh of the shell supports another smaller and more solid one which functions as the framework holding the roof membrane. This is logical as it simplifies execution and optimises the structure by concentrating forces.
The main meshwork is composed of sawn wood panels with edges of 24 mm and 30 mm and 160 mm wide, joined together by butted *finger-joints*. Up to 10 of these panels are then joined together to form a laminated section. In general they are screwed together rather than glued, although in the areas subject to the greatest forces they are joined using adhesive. In the areas with the greatest curvature metal bases are even used as reinforcements, figure 386.
Ribs are necessary at the edges of the shell, as forces concentrate here, figure 388. Metal fittings are also indispensible there as reinforcements.
For snow and wind loads the mesh behaves as a shell and not as a membrane. However, with the semi-rigid joints that are used and even when solely under its own weight, small local flexions arise in the mesh ribs.
The secondary mesh is composed of sawn wood panels with 24 mm edges and 100 mm in width, joined by butted finger-joints that leave gaps of 100 mm × 100 mm. This makes it possible to work on the shell safely, while also providing good illumination.
A transparent white glass-fibre reinforced PTFE membrane rests on the panels, pretensed to an average value of 1 kN/m; steel cables are located on the edge ribs for this and are anchored to them. i.e., the habitual constructive technique for membranes is used, after which its edge is affixed to the edge of the wooden structure. Another transparent ETFE membrane is used in the lines between the modules, and it is supported independently of the other shell.
Except for the membrane, which is installed in situ, the four modules in the shell are made in the workshop, which is highly recommendable. The corbels are affixed to the head during erection. Pretensing of its upper boom aids separation, something which is very important in practice.

Nótese que el entramado de la lámina sustenta otro menor, más cuajado, que sirve de forjado a la membrana de cerramiento. Esto simplifica la ejecución y optimiza la estructura al concentrar esfuerzos.
El entramado principal se construye con tablas de madera aserrada de 24 mm y 30 mm de canto y 160 mm de ancho empalmados por *finger-joints* en testa. Después, se juntan hasta 10 de esas tablas formando una sección laminada. En general la unión se realiza con tornillería, pero en las zonas más solicitadas sí se utiliza el encolado. Y en las áreas de mayor curvatura se refuerza, incluso, con platabandas metálicas, figura 386.
En los bordes de la lámina son necesarios nervios, ya que van concentrando esfuerzos, figura 388. Ahí se hace también imprescindible el auxilio de herrajes metálicos.
Para cargas de nieve y viento el entramado es una lámina, no una membrana. Aunque con las uniones semirrígidas hechas, incluso para peso propio aparecerán pequeñas flexiones locales en los nervios.
La trama secundaria se forma con tablas de madera aserrada de 24 mm de canto y 100 mm de ancho empalmadas por *finger-joints* en testa, que dejan huecos de 100 mm × 100 mm. Eso permite el trabajo sobre la lámina de forma segura y, al mismo tiempo, proporciona una buena iluminación.
Sobre esas tablas se sujeta una membrana blanca transparente (de PTFE reforzada con fibra de vidrio) que se pretensa con un valor medio de 1 kN/m; para lo cual se sitúan cables de acero sobre los nervios de borde, anclados a ellos. Es decir, se emplea la técnica constructiva habitual de las membranas y luego se ancla el borde a la estructura de madera. En las líneas entre módulos se dispone otra membrana, transparente, de ETFE, cuya soporte es independiente de la otra lámina.
Salvo la membrana, colocada in situ, los cuatro módulos que forman la lámina se fabrican en taller, algo muy recomendable. En el montaje se apean, en cabeza, las ménsulas. El pretensado de su cordón superior facilita el desapeo, algo muy importante en la práctica.

Figura 385: Detalle de las torre-soporte al interior.
Detail of the interior tower-supports.

Figura 386: Detalle del arranque de las láminas.
Detail of the base of the shells.

Figura 387: Detalle de la lámina-módulo.
Detail of the shell-module.

Prof. Heinrich Kreuzinger of Munich Technical University (MTU) analysed the dynamic behaviour of this structure. His theoretical model was based on wind tunnel tests, which revealed that the effect of wind pressure was far higher than that of suction, something that a priori was unexpected.

Dynamic experimental measurements were also undertaken to calibrate the model, on the shells before erection as well as the finished work. The final decision was to tie the points of the umbrellas to improve the dynamic behaviour of all the corners, figure 390, as well as at the ends of the corbels.

Thus although wind action did not determine the initial design of the structure, it was sufficiently important to make final adjustments necessary. The shells are like large sails at a height of more than 20 m. Wind tunnel tests were also used to determine the irregular distribution of snow, with a mean value depending on the zone of only 0.75 kN/m; however, there are differences between the umbrellas of up to 70 per cent.

I believe that Herzog's merit, as he is without doubt a good architect and a great expert in wood[a] lies in the fact that he first decided to use a modular roof and then decided to use wood, and he also helped with the creation of the structure. I.e., he defined a good basic project, which is not trivial as it was his function here.

Nevertheless, I believe that Natterer's role is even more indispensible. The technical development of this work was highly complex, and a single wrong step could have ruined the initial concept of the architectural project. Many years of experience in singular works are required to create this one. Natterer expressed all of his experience here superbly. For more information see T. Herzog, 2000 and Natterer, Burger and Müller, 2002.

As we said when talking about the Munich Olympic Stadium for the 1972 Games (see 63) Natterer had already proposed using a truly spectacular tensile wooden roof (see Eckhout, 1971). This was followed by many singular structures. This work is without doubt the most symbolic one in his entire excellent career. I believe that in some way he achieved a dream here which he had been unable to fulfil in Munich.

[a] New students or casual readers should not confuse Thomas Herzog with Jacques Herzog, who is better known and is the partner of Pierre De Meuron, whose architectural style is quite dissimilar.

El comportamiento dinámico es analizado por el Prof. Heinrich Kreuzinger, de la Universidad Técnica de Munich (TUM). El modelo teórico se apoya en ensayos de túnel de viento, que desvelaron que el efecto de la presión del viento era mucho mayor que el de la succión, algo, a priori, inesperado.

También se realizaron medidas experimentales dinámicas, de cara a calibrar el modelo, sobre las láminas antes de montar y sobre la obra acabada. La decisión final fue la de atar los paraguas en sus puntas para mejorar el comportamiento dinámico de conjunto en las esquinas, figura 390, y en los extremos de las ménsulas.

Es decir, la acción de viento no marcó el diseño inicial de la estructura, pero si era de la entidad suficiente como para obligar a ajustes finales. Las láminas son grandes velas situadas a más de 20 m de altura.

Los ensayos en túnel de viento sirvieron también para determinar la distribución irregular de la nieve, cuyo valor medio, por la zona, es solo de $0,75\,\mathrm{kN/m^2}$; pero con diferencias entre paraguas de hasta el 70 por ciento.

Creo que el mérito de Herzog, sin duda un buen arquitecto y un gran conocedor de la madera[a], es el de apostar primero por una gran cubierta modular de esas luces y luego por la madera, colaborando además en la gestación de la estructura. Es decir, definir un buen proyecto básico. Y eso no es poco; es su función aquí.

Pero creo que la figura de Natterer es imprescindible. Esta obra es de un complejísimo desarrollo técnico, y un mal paso en ese camino hubiera dado al traste con la idea inicial del proyecto arquitectónico.

Hacen falta muchos años de experiencia, y en obras singulares, para crear esta obra. Natterer ha plasmado aquí toda su maestría de manera soberbia. Para más información véase T. Herzog, 2000 y Natterer, Burger y Müller, 2002.

Como se comentó al hablar del Estadio Olímpico de Munich del 72 (véase la página 63), Natterer ya había propuesto entonces una cubierta tensada de madera realmente espectacular (véase Eckhout, 1971). Después haría multitud de estructuras singulares. Esta obra es, seguramente, la más simbólica de toda su excelente carrera. Creo que, de algún modo, realiza el sueño que no pudo cumplir en Munich.

[a] El estudiante novel, o el diletante, no debe confundir a Thomas Herzog con Jacques Herzog, más conocido y socio de Pierre De Meuron, cuyas obras tienen poco que ver.

Figura 388: Detalle de borde de las láminas en el extremo de las ménsulas.
Details of the shell edges at the head of the corbels.

Figura 389: Detalles de borde de las láminas en las esquinas.
Detail of shells edge at the corners.

Figura 390: Detalle de unión entre paraguas en esquina.
Detail of the joints between the umbrella corners.

This work is like a large item of furniture that is able to make its technical complexity seem secondary, and that is fantastic. It centres on the roof as the symbol of protective covering, and wood. Technique here regains its original meaning, inseparable from the modern concept of art.

This work is Natterer's most singular creation, as it is also one of the most singular works created to date. It may therefore stimulate us to think more generally about wooden structures.

When cast iron and grids emerged, followed by steel and reinforced concrete, wood lost much of its importance as a first-order structural material during the 19th century, most especially from mid-century onward.

This is shown by the gradual loss of teaching about this material in Architecture and Engineering Schools. However, things started to change around the 1970s. Wood started to regain the place it should never have lost. This process is slow but unstoppable.

It remained important in construction in some countries, although there too it had been abandoned to a certain degree; this was so most especially in Germany and the Scandinavian countries. It had remained important in Germany above all, where the medieval guild of carpenters still survives.

The problem was worse in Spain due to its awful economic situation. But we have an important heritage of work in wood, which when it was created was at the same level as that of any other country.

This work may also show that the great engineers of the past were wrong when they thought that wood was not a very suitable structural material. And nowadays there is still a lack of knowledge about wood in many professional fields, dominated as they are by concrete and steel.

However, wood cannot replace steel and concrete, as it is another type of material. Although it is unsuitable for many areas in civil engineering, as a building material it has important niches, above all for roofing and in singular buildings. Architecture and engineering students cannot continue to ignore it. An indispensible manual is T. Herzog et al., 2004.

La obra parece un gran mueble que consigue que su complejidad técnica quede en segundo plano, y eso es algo fantástico. La cubierta, como símbolo de techo protector, y la madera son los protagonistas. La técnica vuelve a tomar su sentido original, indisoluble del concepto moderno de arte.

Esta obra no solo es la más singular de Natterer, es una de las más singulares hechas con madera hasta la fecha. Nos puede, por tanto, servir de palanca para hacer alguna reflexión más general sobre las estructuras de madera.

A lo largo del siglo XIX, con la aparición del hierro fundido y forjado, y luego del acero y del hormigón armado, la madera pierde protagonismo como material estructural de primer orden. Y en las Escuelas de Arquitectura e Ingeniería se reflejó en una reducción paulatina de la enseñanza de la técnica de la madera.

Pero la cosa comenzó a cambiar en torno a los años 70 del pasado siglo. La madera empezó a recobrar el lugar que nunca debió perder. El proceso está siendo lento pero imparable.

En la práctica constructiva, ha habido países que han mantenido un pulso potente, aunque también hubiera un cierto abandono, como Alemania y los Países Nórdicos. Sobre todo en Alemania, donde aún pervive el gremio medieval de carpinteros.

En España el problema se agravó debido a la penosa situación económica. Pero tenemos un patrimonio en madera importante, y que en su momento estuvo a la altura del de cualquier otro país.

La EXPO-Dach puede poner en evidencia que grandes ingenieros del pasado se equivocaron al pensar que la madera no era un material demasiado apto para la estructura, y que todavía hoy es demasiado lo que se desconoce de él en muchos ámbitos profesionales, dominados por el hormigón y el acero.

Pero la madera no puede sustituir al acero y al hormigón. Es un material más. No es adecuado para muchos ámbitos de la ingeniería civil. Pero en edificación tiene nichos importantes, sobre todo en cubiertas y en edificios singulares. El estudiante de arquitectura e ingeniería no puede, hoy, seguir desconociéndolo. Un manual imprescindible es T. Herzog y col., 2004.

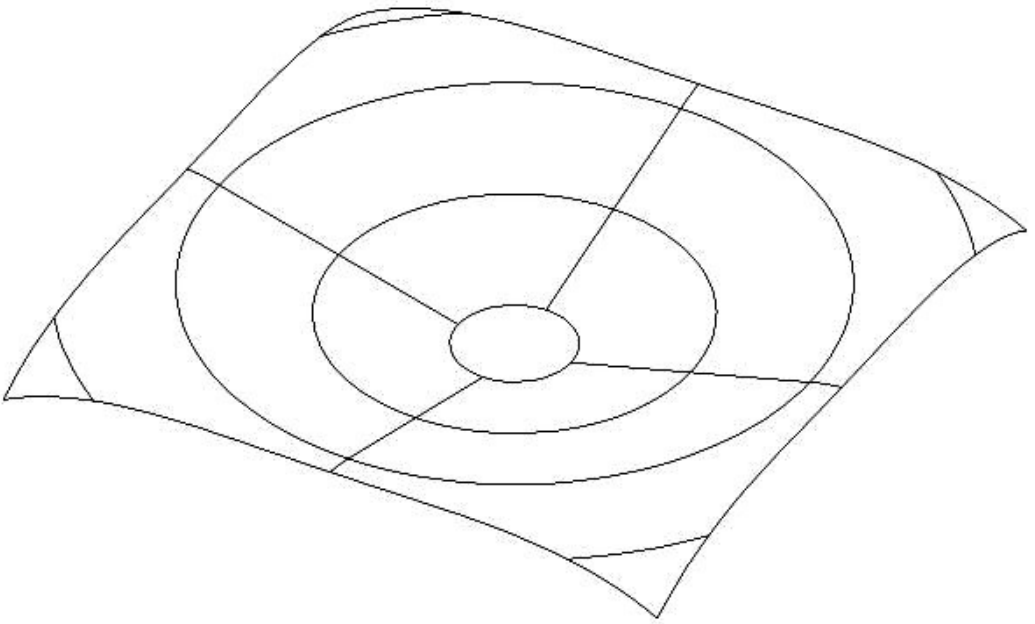


Figura 391: Los paraguas de Amancio Williams, solución T1 paramétrica con Grasshopper.
Amancio Williams umbrellas, parametric T1 solution using Grasshopper.

Los paraguas de Amancio Williams

**Amancio Williams' umbrellas:
small structural sacrifices in return for a great architectural success.**

Although the Argentinean Amancio Williams (1913-1989) was trained in architecture and engineering, he mainly worked in architecture. Both sides of his training are reflected in many of his works, and of course this is the case for his umbrellas.
He does not have many constructed works, and nevertheless he is one of the best architects of his time. His pioneering proposals would, if he had been born in another country, be far better known and appreciated. Until a short time ago he was a cult architect in many places. He reminds me in a way of Cedric Price, whose unbuilt work has had an enormous influence in certain fields (see page ¡Error! Marcador no definido.).
The likeable umbrellas were built in several works during the 1960s and 1970s figure 391 they consist of projecting reinforced concrete surfaces over a central reinforced concrete support, square and measuring about 10 m along the sides (projecting 5 m). Their slightly undulating profile makes them unmistakable and unique.
I studied their structure in an exercise in the Upper Technical School of Architecture, Madrid, using the SAP2000© structures program. But beforehand it was necessary to know their geometry, and there were no exact data on this, only photographs.
In the attempt to find a geometry the problem was parameterized using the Grasshopper© plug-in for Rhinoceros©. That was really a part of the exercise. The geometries obtained were first exported as a dxf file (and another type) and then imported into v.14 of SAP2000©, although a slight manual adjustment is always necessary to achieve correct discretization (or it was when I did this) .
Figures 391 and 392 show two of the solutions for two different types of parameterization. The one in figure 391 was the last to be tried and interestingly it is the most obvious, and I believe that it is the solution that was selected by Williams[a]. It is revolution geometry that is then cut in four vertical planes at the edges. The form of the generatrix was parameterised. After this creating the revolution surface and cuts in it along four vertical plans is immediate, and this was included in the Grasshopper routine.

[a]This hypothesis is also supported by a photograph of his showing him holding a wire model.

**Los paraguas de Amancio Williams:
pequeñas cesiones estructurales a cambio de un gran éxito arquitectónico.**

El argentino Amancio Williams (1913–1989) estudió arquitectura e ingeniería, aunque su ejercicio profesional se orienta hacia la arquitectura. Esa doble formación se refleja en muchas de sus obras, y desde luego en sus paraguas.
No tiene mucha obra construida, pero es uno de los mejores arquitectos de su época, con propuestas pioneras que, de haber nacido en otro lugar, serían hoy mucho más conocidas y valoradas. Hasta hace poco era un arquitecto de culto. En cierto sentido me recuerda a Cedric Price, cuya obra no construida tiene también enorme influencia en ciertos ámbitos (véase la página 299).
Los paraguas, realizados en los años 60 y 70, figura 391, son obras entrañables. Son láminas de hormigón armado en voladizo, sobre un soporte central también de hormigón armado, de planta cuadrada y en torno a 10 m de lado (5 m de vuelo). Su perfil ligeramente ondulado los hace inconfundibles y únicos.
En un ejercicio realizado en la ETS de Arquitectura de Madrid me planteé su estudio estructural. Para ello se usó el programa de análisis SAP2000. Pero antes había que conocer la geometría, y no había datos precisos, tan solo fotos.
Para tratar de encontrar una geometría se parametrizó el problema mediante el *plug-in* Grasshopper para Rhinoceros. Esto, en realidad, era parte del ejercicio. Las formas obtenidas se pueden, después, exportar como archivo dxf (y de otro tipo) y luego importar a la v.14 de SAP2000, aunque siempre es necesario un ligero retoque manual para tener una correcta discretización (al menos cuando lo hice).
Las figuras 391 y 392 muestras dos de las soluciones para dos tipos distintos de parametrización. La de la figura 391 fue la última que se probó, curiosamente la más obvia, y creo que es la solución adoptada por Williams[a]. La geometría es de revolución y luego se recorta por cuatro planos verticales en los bordes. La forma de la generatriz se parametrizó. Desde ahí crear la superficie de revolución y su corte por cuatro planos verticales es inmediato y queda incluido en la rutina de Grasshopper.

[a]La hipótesis se apoya además con alguna foto suya en la que aparece sosteniendo un modelo hecho con alambres.

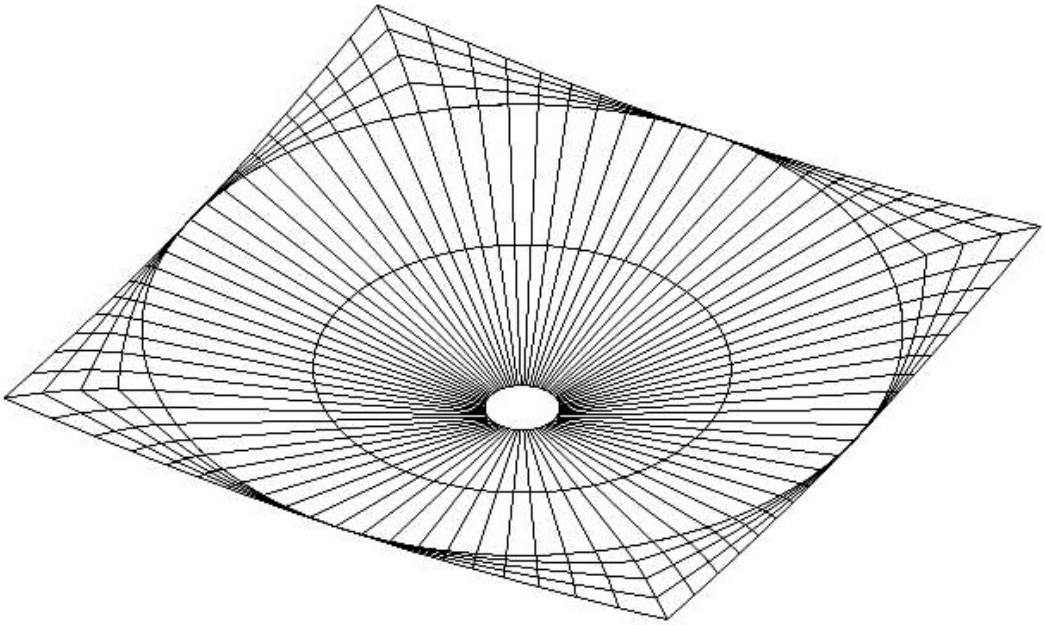


Figura 392: Solución T2 paramétrica con Grasshopper. *Parametric T2 solution using Grasshopper.*

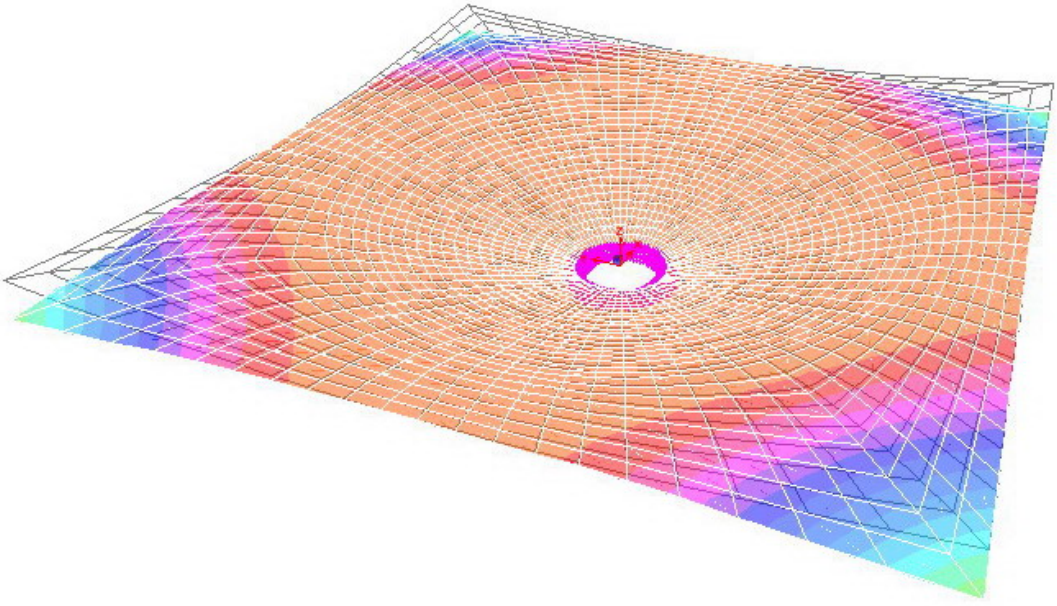


Figura 393: Desplazamientos verticales a peso propio. *Map of vertical displacement due to its own weight.*

Irrespective of the generatrix used, the majority of the surface is clearly a revolution surface, so that the majority of the structure functions as a membrane in a very effective and rigid way. For the case of its own weight, if we centre on the case of the trunk of the cone, according to the meridians there are compression forces that increase in a non-lineal way towards the support (due to the large reduction in the resisting area); while the parallels are traction forces and increase lineally towards the exterior edge (due to the loss of curvature). This is a very well-known solution.

In any case, regardless of its directrix the part composed of a revolution surface is compatible with a membrane solution for symmetrical load (of any type). I.e., the greatest part of the surface may function at a high percentage as a membrane. In the four corners, when the continuity of the parallels disappears from the revolution surface the structure is only able to function as a projecting plate, although its span is already very small.

As the wind also creates asymmetries, working as a shell is inevitable although the flexions will be slight; the membrane predominates. This is seen very clearly when looking at the vertical movements for own weight loads, figure 393, which are very low and almost invariable in the zone that functions as a membrane, and they become relevant and increase in the corners, which functions as projecting plates.

The form of undulating revolution and the square shape pay the price of flexions in the corners, but it is a low price. This shape is therefore very effective, and the architectural result is fantastic.

This structure is therefore far more rational than it may seem at first sight. Its concession at the edges, without compromising its structure, is a rarely-used strategy in the design of umbrellas and shells in general.

Concession in a part of the structure stands at the very root of architecture, which is not aimed at optimising this. And this is not only the case in buildings, as it also applies to civil engineering.

Nevertheless, as is logical, the greater the size the harder it is to make structural concessions. And in building works the margin is usually very wide; highly rational solutions may be used which at the same time also make concessions just where this harms the structure the least. This work is a marvellous example of this. These short remarks pay homage to his whole work. For more information see the web page `http://www.amanciowilliams.com/`.

En la mayor parte de la superficie, sea cual sea la generatriz, es claro que se trata de una superficie de revolución, por lo que, en su mayor parte, la estructura funciona como una membrana, de forma muy eficaz y rígida. Para el caso del peso propio, si nos centramos en el tronco de cono, según los meridianos los esfuerzos son de compresión y crecen de manera no lineal hacia el apoyo (debido a la fuerte reducción del área resistente); y, según los paralelos, son de tracción y aumentan de manera lineal hacia el borde exterior (debido a la pérdida de curvatura). Es una solución muy conocida.

En cualquier caso, la parte formada por una superficie de revolución, tenga la directriz que tenga, es compatible con una solución de membrana para carga simétrica (del tipo que sea). Es decir, la mayor parte de la lámina puede funcionar, en un alto porcentaje, como una membrana.

En las cuatro esquinas, cuando desaparece la continuidad de los paralelos en la superficie de revolución, la estructura solo puede funcionar como una placa en voladizo. Pero con una luz reducida. Como, además, el viento introduce asimetrías, el funcionamiento como lámina es inevitable, pero con flexiones reducidas, la membrana predomina. Esto se aprecia muy bien observando los movimientos verticales para peso propio, figura 393, que son muy bajos y casi inapreciables en la zona trabajando como membrana, y van siendo relevantes y crecientes en las esquinas, trabajando como placas en voladizo.

La forma de revolución ondulada y planta cuadrada paga el precio de las flexiones de las esquinas, pero supone un coste reducido. Es decir, la forma es muy eficaz; y el resultado arquitectónico fantástico. Se trata, por tanto, de una estructura mucho más racional de lo que pudiera parecer a simple vista. Su cesión en los bordes, sin comprometer a la estructura, es una estrategia poco usada en el diseño de paraguas y de láminas en general.

El ceder en una parte de la estructura está en la raíz misma de la arquitectura, que no se orienta a su optimación. Y no solo sucede esto en edificación, también en obra civil. Aunque, como es lógico, cuanto mayor es el tamaño más difícil es hacer concesiones con la estructura. Y en edificación el margen es, por lo general, muy amplio, y se pueden proponer soluciones con alta racionalidad que, al mismo tiempo, cedan donde menos compromete la estructura. Esta obra es un maravilloso ejemplo de ello.

Sirvan estos escasos comentarios como homenaje a toda la obra de Amancio Williams. Para más información véase la página web `http://www.amanciowilliams.com/`.

Figura 394: Reconstrucción del pabellón de España en la exposición de Bruselas de 1958, vista general.
Reconstruction of the Spanish pavilion in the Brussels 1958 Expo, general view.

Pabellón Exposición Universal de Bruselas, 1958

The Spanish pavilion in Brussels Universal Expo, 1958:
architecturally avant-garde with classical compositional structures and humble spans.

The Spanish pavilion in Brussels Universal Expo 1958 Was by the architects José Antonio Corrales and Ramón Vázquez Molezún. The work was awarded by a competition in 1956. It had to be possible to dismantle the pavilion for subsequent reconstruction in Spain. In 1959 it was disassembled and then was partially erected again in the Casa de Campo, Madrid, figures 394 and 395, where all of the photographs shown here were taken. The building is now a ruin (the photographs date from 2014), although in spite of this it is still visibly an exceptional work.

Corrales and Molezún were members of the first generations of Spanish architects who connected with the international vanguard. The first to do so was probably De la Sota, who was somewhat older and worked with them on several projects. Although Corrales and Molezún did not share a studio, they worked together on many projects, probably the best ones by both of them. And of these high quality works this is perhaps the finest.

This project is based on a regular horizontal hexagonal pattern, figure 396. The module is structural, too, an umbrella composed of an inverted hexagonal pyramid with sides 3 m long projecting from its central support. The total height of the type is 6 m, with variations to permit the entrance of light from above and to differentiate the different zones in the project. This is a vital aspect of this project.

The pyramid itself is about 60 cm tall. This height gives "an edge" to the umbrella structure. The perimeter hoops under traction the radial ribs which work under flexion-compression and are supported at each end. This makes it possible to resolve the 3 m projection simply, based on a classical idea.

So that they can be disassembled, each section of the pyramid forms a constructive unit, with subdivisions half way across its span with inverted **T**–shaped steel sections that make it possible to support (originally) wood fibre and cement panels (of the Durisol type). The exterior perimeter of the steel section is **L**–shaped, and the radial ribs are in the form of a **T** rotated 90 degrees that, once the structure has been erected, are joined to vertical steel strips that increase the inertia of the ribs, figure 395, so that the **L** and **T**–shaped sections of the removable module can be small. The exterior surface was made regular using mortar and covered by a waterproof coating.

El pabellón de la Exposición Universal de Bruselas, 1958: vanguardia arquitectónica con estrategias compositivas clásicas y luces humildes.

El Pabellón de España de la Exposición Universal de Bruselas de 1958 es obra de los arquitectos José Antonio Corrales y Ramón Vázquez Molezún. Ganadores de un concurso en 1956. El pabellón debía ser desmontable para su posterior reconstrucción en España. En 1959, en efecto, se desmontó para volver a levantarlo, parcialmente, en la Casa de Campo de Madrid, figuras 394 y 395, de donde son todas las imágenes que aquí se muestran. El edificio está ahora en estado de ruina (las fotos son de 2014). Y, a pesar de ello, todavía se percibe lo excepcional de la obra. Corrales y Molezún pertenecen a las primeras generaciones de arquitectos españoles que conectan con la vanguardia internacional. El pionero probablemente fue Alejandro De la Sota, algo mayor, con quién colaboraron en varios proyectos. Corrales y Molezún no compartieron estudio, pero trabajaron juntos en muchas obras, seguramente las mejores de ambos. Y esta es, quizás, la de mayor calidad.

El proyecto se basa en una trama regular hexagonal en planta, figura 396. El módulo es también estructural, un paraguas formado por una pirámide de planta hexagonal de 3 m de lado invertida y volada desde el soporte central. La altura total tipo es de 6 m, con variaciones para permitir la entrada de luz cenital y matizar las distintas zonas del conjunto. Esta variación de la cota de los módulos es fundamental.

La pirámide tiene una altura de unos 60 cm. Esta altura proporciona el "canto" necesario a la estructura del paraguas. El perímetro zuncha en tracción los nervios radiales que trabajan a flexo–compresión biapoyados en sus dos extremos. Eso permite resolver el vuelo de 3 m de forma sencilla. Es una idea clásica.

Para ser desmontable, cada paño de la pirámide forma una unidad constructiva, con subdivisiones a la mitad de la luz formalizadas por perfiles de acero en **T** invertida que permiten apoyar, originalmente, paneles de fibras de madera y cemento (tipo Durisol). En el perímetro exterior el perfil de acero es tipo **L**, y en nervios radiales una **T** rotada 90º que, una vez montada la estructura se une a pletinas de acero verticales que dan mayor inercia a los nervios, figura 395, permitiendo que los perfiles **L** y **T**, del módulo desmontable, sean pequeños.

Por el exterior, un mortero regularizaba la superficie, sobre el que se coloca la impermeabilización.

Figura 395: Vista inferior de un módulo. *View under a module.*

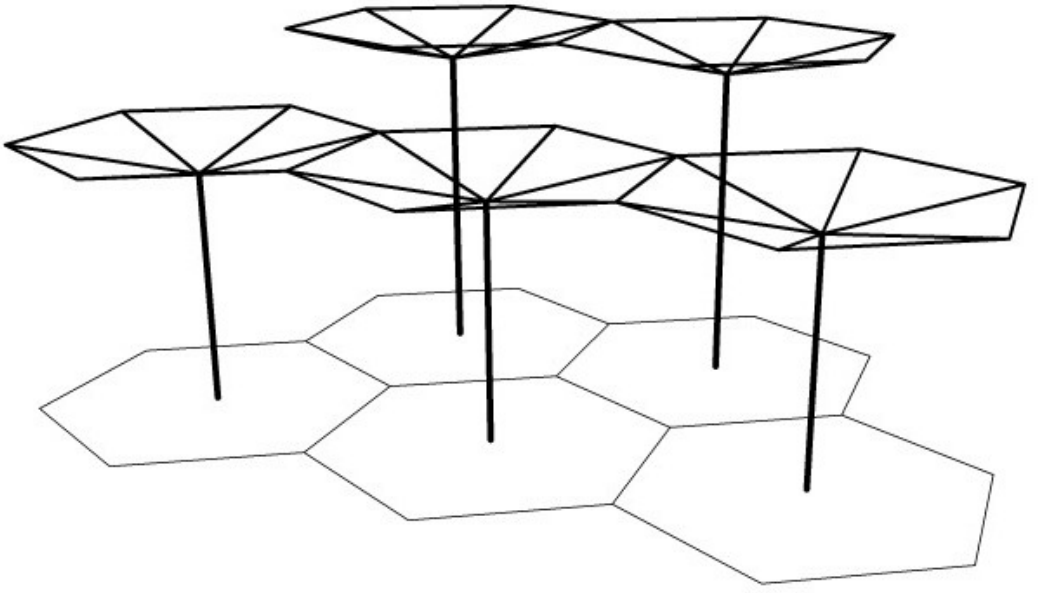


Figura 396: Esquema del sistema modular. *The modular system pattern.*

The vertical strips are bolted to other strips welded to the head of the support, figure 395, which as well as making sense in constructive terms also creates a pretty capital on the support. The standard support, which is embedded in its base, was made of hollow steel tubing 133 mm in diameter on the outside, with a wall thickness of 12 mm. Water drained down the inside of the tube. This was also the case in other projects like this one, as there is no other solution. I admit that this question has always given rise to a certain anxiety within me, as any blockage together with a lack of maintenance may have very harmful consequences. This is a very serious problem at a larger scale, as has been found in practice. But this is the price that has to be paid, and it has to be evaluated to see whether or not it can be accepted. The roof was mainly in glass set in natural colour anodized aluminium members, in modules measuring 3 m × 1 m. Other roof panels had no openings and were in brick, as can be seen in the in the Casa de Campo, figure 394. This is a brilliant project. Its modular structure is simple and effective, and its construction withstood changes of approach robustly, and it continues to do so. The structure here is perfectly integrated within the architectural project, and they are one and the same, although I would not say that it is the source here. The root of this project is its use of the pattern that combines all of its aspects masterfully, not only the structural aspect.

The small span of the module must be kept in mind, with a projection of 3 m. It is not necessary to perform structural marvels to achieve good architecture. Nor is this high tech; and nor does it have to be, given that this per se does not lead to good architecture.

Although this project is avant garde, its basic compositional scheme is classical. F. L. Wright has magnificent works based on regular patterns, as their starting point. These are not solutions arising from the modern movement or other cutting-edge trends, as these solutions are atemporal. It is how materials are used that generally expresses the accent of the time. What is totally modern here is the lack of clearly defined edges in the floor plan. It is like a section taken from an infinite pattern. Classical architecture always clearly defines its borders, and within them it points of access are strongly emphasised.

This lack of definition fits with the Zeitgeist of modern society, as it does not seem to recognise any invariable principles or clear limits in many fields. However, I do not know if the connection between them is more of a wish than it is a reality, as the project decision is surely far more influenced by the need to adapt to a certain topography and the irregular edges of the plot.

Las pletinas verticales vienen atornilladas a otras pletinas soldadas en cabeza de soporte, figura 395, lo que además de tener sentido constructivo, acaba creando un bonito capitel al soporte.

El soporte tipo, empotrado en su base, era de tubo hueco de acero de 133 mm de diámetro exterior y un espesor de 12 mm. El desagüe se efectúa por dentro del tubo. Así se hace en otros proyectos de este tipo pues no queda otro remedio. Reconozco que es una cuestión que siempre me ha causado cierta angustia, ya que cualquier atasco, unido a una falta de mantenimiento, puede tener consecuencias muy dañinas. A mayor escala este problema es más grave, como la práctica ha demostrado. Pero son peajes inevitables, a valorar en su caso si se asumen o no.

El cerramiento mayoritario era de vidrio montado sobre una carpintería de aluminio anodizado color natural, con módulos de montaje de 3 m × 1 m. Otros paños eran ciegos, de fábrica del ladrillo, como ahora se aprecia en los restos de la Casa de Campo, figura 394.

Es un proyecto brillante. La estructura modular es simple y eficaz, y su construcción soportó cambios de enfoque con solidez y personalidad, y lo seguiría haciendo. La estructura está perfectamente integrada en el proyecto de arquitectura, como un todo, aunque yo no diría que es generadora. El origen del proyecto está en la elección de la trama que integra todos los ámbitos del conjunto de manera magistral, no solo el de la estructura.

Hay que recordar la pequeña luz del módulo, 3 m de vuelo. No hace falta hacer alardes estructurales para conseguir buena arquitectura. Tampoco hay *high tech*; y ni tiene por qué haberla ya que la alta tecnología, por si sola no genera buena arquitectura.

El proyecto es vanguardista, pero el esquema compositivo básico es clásico. F. L. Wright tiene magníficas obras que se apoyan en tramas regulares como punto de partida. No son aportaciones del movimiento moderno ni de otras vanguardias, son soluciones intemporales. Es el manejo de los materiales, por lo general, el que introduce el acento temporal.

Lo que sí es totalmente moderno es la ausencia de bordes definidos de la planta. Es como una trama infinita de la que se ha extraido una porción. La arquitectura clásica siempre define con más claridad el contorno, y dentro de este, los accesos también cobran mucho más protagonismo. Esa indefinición entronca con el *Zeitgeist* de la sociedad contemporánea que no parece reconocer principios inmutables, ni límites claros en muchos ámbitos. Aunque el vínculo no sé si es más un deseo que una realidad, porque la decisión de proyecto seguramente está más relacionada con la adaptación a una topografía y a los bordes irregulares de la parcela.

Figura 397: Marquesina de la Plaza del Paraguas, vista general. *General view of the umbrella.*

Plaza del Paraguas

**The Plaza del Paraguas shelter:
a work that is as simple as it is delicious.**

In 1929 the engineer Ildefonso Sánchez del Rio built a shelter in a square of the capital city of Asturias, Oviedo, that is now known in honour of this work as the "Plaza del Paraguas" ("Umbrella Square"), figure 397. Many authors have tried to get the users of their works to call them by the names they wished to give them (which are often too conceited); and the collective intelligence usually gives them a name that is as precise as it is implacable.

The engineer Ildefonso Sánchez del Río Pisón graduated at the same time as Eduardo Torroja, although he had a far different approach to projects. In the Engineering School the benchmark for this generation was set by Eugenio Ribera. Until a short time ago Sánchez del Río was almost unknown. He was rescued from oblivion by an exhibition in 2011 that surprised many people, including the writer.

Although he started his professional life as a draughtsman, he became a businessman in the field of building, commercialising systems that he himself had patented.

It is clear that he was not an architect at the level of Torroja or Fernández Casado. But nor was he a run-of-the-mill engineer. Some of his works are stupendous and daring, with simple but forceful designs. Two of these are included here: the shelter in what is now known as the Plaza del Paraguas, one of his first works, and Pola de Siero Market, which also dates from the start of his career but is daring and complex.

In principle his works always express a simple approach, in terms of how they are constructed and, no less important then, analysis. It may be considered surprising now that Pola de Siero market was analysed using graphic statics, although this work is probably less complex than he thought. Some complex aspects were resolved in the laboratory, such as the behaviour of the standard ribs used in Oviedo Sports Hall, although Torroja would do that, too.

**Marquesina de la Plaza del Paraguas:
un obra tan elemental como deliciosa.**

El ingeniero Ildefonso Sánchez del Rio construye en 1929, en Oviedo capital, una marquesina en lo que ahora, en honor a esta obra, se llama plaza del Paraguas, figura 397. Muchos autores han intentado que los usuarios de sus obras llamaran a las mismas según sus deseos (a veces demasiado vanidosos); y la inteligencia colectiva suele bautizarlas de forma tan acertada como implacable.

El ingeniero Ildefonso Sánchez del Río Pisón es de la promoción de Eduardo Torroja, aunque su manera de enfrentarse a los proyectos es distinta. Es una generación que tuvo de referente, en la Escuela de Caminos, a Eugenio Ribera.

Hasta hace bien poco, Sánchez del Río era casi un desconocido. Una exposición de 2011 lo rescató del olvido, para sorpresa de muchos, incluido el que aquí escribe.

Su vida profesional arrancó como proyectista, pero después se convirtió en empresario de la construcción, comercializando sistemas patentados por él.

Está claro que no es un proyectista de la talla de Torroja o Fernández Casado. Pero tampoco es un ingeniero menor. Tiene obras estupendas y osadas, con planteamientos de diseño sencillos pero contundentes. De entre ellas, se recogen dos: la marquesina de la Plaza del Paraguas, una de sus primeras obras, y el Mercado de Pola de Siero, también de sus comienzos, que es una obra atrevida y compleja.

En principio, sus obras siempre tenían un enfoque sencillo, desde lo constructivo hasta el análisis. Pola de Siero se analizó utilizando estática gráfica, algo que ahora puede parecer sorprendente, aunque en ese proyecto, probablemente, tenía entre manos algo más complejo de lo que él pensaba. Algunas partes complicadas las resuelve en el laboratorio, como el comportamiento de las costillas tipo que usa en el Palacio de Deportes de Oviedo (lo que también hará Torroja).

Figura 398: Vista inferior de la marquesina. *View of the umbrella from below.*

Beauty for him is not an independent category, as it arises from the logic of the project process. Although this seems somewhat ingenuous to me, his designs really are like that, and beauty is not sought a priori.
But in general it is true that he rejects shells due to their mathematical complexity, and instead uses systems of planes or ones that can be expressed in terms of planes. This makes him totally different from Torroja.
However, both of them are finally able to work with a very high degree of uncertainty.
In this case, calling the shelter an umbrella is a great complement, as that was its function: to protect the ladies who sold milk there. I would explain to those who do not know the Asturian weather that this shelter had to be used almost continuously. That the shelter has given the name to the square where it stands is indeed praise of its author.
And this work is in fact umbrella-shaped, except that it lacks the typical struts. That very much confused the local people, who thought that it would fall once the scaffolding was removed. It is that although it works in a simple way, how it works may not be obvious.
This is a work from his youth, and it is wonderfully fresh. The roof surface was changed recently very respectfully and correctly, I believe); it used to be fibre cement and now it is copper over wooden board.
The main structure in reinforced concrete projects about 6 m outward, figure 398. It is composed of 24 meridian ribs that work in flexion-traction, with two parallel ribs that work under compression (with minimal flexor moment) very well placed for a balanced distribution of the flexor moments of the meridian ribs. This is basically a ribbed shell.
The parallel ribs prevent the umbrella from "folding". I.e., they substitute the umbrella struts. And they do so very cleanly. They follow a circumferential path in a cross-section that varies with the slope. This is impeccable in design terms, and it is constructed rationally.
The support is inevitably embedded in the foot and top. There is backing at the top, joined in the design to the capital and necessary for the clean arrangement of the frame, and once again impeccable.
Although structure here is the source, the project concept guides the work: the simile of an umbrella. This is a delicious work.

La belleza no es para él una categoría autónoma, surge de la lógica del proceso de proyecto. En eso creo que hay una cierta ingenuidad, pero lo cierto es que sus diseños son realmente así, la belleza no se ha buscado a priori.
En general, es cierto que Sánchez del Río huye de las láminas, por su complejidad matemática, y recurre a sistemas planos o asimilables a planos. En eso hay una diferencia abismal con Torroja. Pero, al final, ambos son capaces de manejar con habilidad un grado de incertidumbre muy notable.
En este caso, llamar *paraguas* a la marquesina es un halago. Esa era la función de la obra: proteger a las lecheras que vendían en la plaza sus productos. A los que no conozcan el clima asturiano, les diré que la marquesina debía usarse de forma casi continua. Y que la plaza se renombre así es todo un homenaje a su autor.
La forma de la obra recuerda, efectivamente, a un paraguas, salvo porque no tiene los típicos jabalcones. Eso desconcertó mucho a los vecinos, que, durante la construcción, apostaban por su colapso una vez desapuntalada. Y es que su funcionamiento, siendo simple, no es obvio. Es una de sus obras de juventud, llena de una frescura asombrosa. Recientemente se ha cambiado el cerramiento de cubierta (creo que con mucho respeto y acierto), antes de fibrocemento y ahora de cobre sobre una tablazón de madera.
La estructura principal, de hormigón armado, tiene unos 6 m de vuelo, figura 398, y se compone de 24 nervios meridianos, que trabajan en flexo-tracción, y dos paralelos en compresión (el flector es mínimo), muy bien colocados para una distribución compensada de los flectores de los meridianos. En el fondo, es una lámina de nervaduras.
Los paralelos evitan el "plegado" del paraguas. Es decir, sustituyen a los jabalcones de los paraguas, y lo hacen dando mucha limpieza al uso. Tienen un trazado circunferencial, con la sección girada según la pendiente. Formalmente es un objeto impecable, y la construcción es racional. El soporte está, inevitablemente, unido rígidamente en el extremo superior y pie. En cabeza se crea un macizado, unido formalmente al capitel, que es necesario para una límpia disposición del armado. De nuevo impecable.
La estructura es generadora, pero hay además una idea de proyecto que guía el trabajo: el símil del paraguas. Es una obra deliciosa.

Figura 399: Vista exterior del mercado de Pola de Siero.
External view of the Pola de Siero marquet.

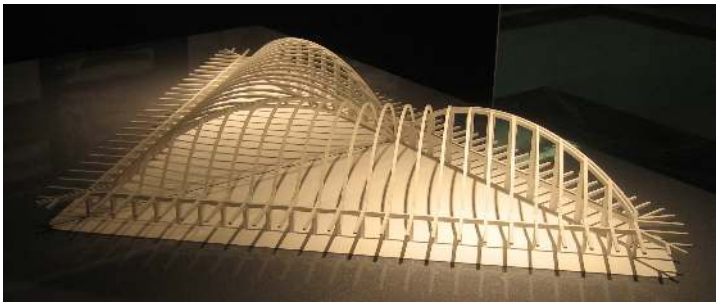


Figura 400: Maqueta de la estructura del mercado.
Model of the structure of the Pola de Siero marquet.

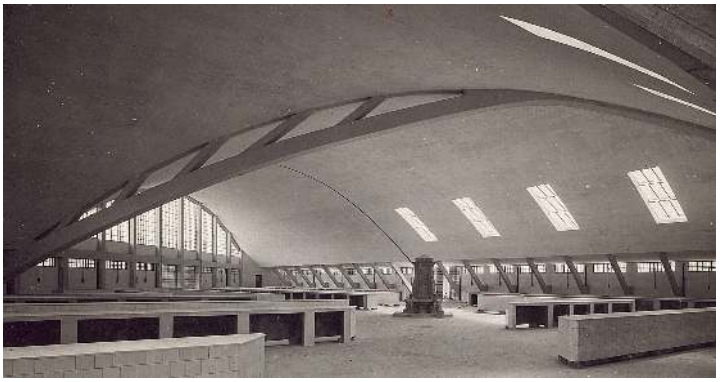


Figura 401: Vista interior de la obra recién finalizada.
Interior view of the recently finished building.

Mercado de Pola de Siero

Pola de Siero market:
a superb work with a complex structure resolved by graphic statics.

Pola de Siero market (1931), figures 399 and 400, is by the engineer Ildefonso Sánchez del Río Pisón.
The building adapts in a disciplined way to its site, figures 400 and 402, creating the floor plan of an isosceles rectangular triangle with a hypotenuse 100 m long along the main street and legs 70.71 m long. On this simple basis the shape he decided on is quite surprising; he creates an envelope defined by two parabolic vaults parallel to the legs with a span of half their length. They therefore intersect perpendicular to the main facade.
The arches in the facade, figure 399, are the result of the intersection of these vaults with the vertical plan of the facade. But the fact that he uses a parabolic shape reveals that he does not intend using a complex pattern; the main structure is composed of parabolic reinforced concrete arches that project outwards almost 3 m. A concrete slab approx. 12 cm thick is supported between the arches, and it not only functions as a frame but also in some areas it helps with the axial forces in the main structure. He did not forget an opening for overhead lighting, although I believe that this is too small.
Some joints that arise from the middle of the legs and which only reach the keystone of the vaults, once again confirm that he has no intention of making the whole vault a shell, even though part of the same does aid the primary scheme, as was pointed out. The joint is somewhat visible in figure 401.
One of the most unexpected results is the shape of the diagonal arch located at the intersection of the vaults, figures 401 and 404, which protrudes from the said surface towards the interior along some of its line so that it can be anti-funicular.

El Mercado de Pola de Siero:
una soberbia obra con una compleja estructura resuelta utilizando estática gráfica.

El Mercado de Pola de Siero (1931), figuras 399 y 400, es obra del ingeniero Ildefonso Sánchez del Río Pisón.
El edificio se adapta de forma disciplinada al solar, figuras 400 y 402, creando una planta de triángulo rectángulo isósceles con una hipotenusa de 100 m de largo a la calle principal y unos catetos de 70,71 m. Y con ese simple punto de partida, la forma por la que se opta tiene bastante de sorprendente: crea una envolvente definida por dos bóvedas parabólicas paralelas a los catetos con una luz de la mitad de ellos. Su intersección, por tanto, es perpendicular a la fachada principal. Los arcos de fachada, figura 399, son el resultado de la intersección de dichas bóvedas con el plano vertical de la fachada.
Pero el hecho de usar un trazado parabólico desvela que no se pretende utilizar un esquema complejo: la estructura principal la forman arcos parabólicos de hormigón armado que sobresalen al exterior a casi 3 m de separación. Entre ellos apoya una losa de hormigón (de unos 12 cm), que no solo hace de forjado sino que, en algunas zonas, debe colaborar con axiles en la estructura principal. No se olvida de abrir huecos para el paso de luz cenital, aunque creo que se queda escasa.
Unas juntas que arrancan en la mitad de los catetos, y que solo llegan a la clave de las bóvedas, vuelve a confirmar que no tiene intención de construir una lámina de toda la bóveda, a pesar de que parte de la misma sí colabore en el esquema primario. La junta se distingue ligeramente en la figura 401. Una de los resultados más sorprendentes es la forma del arco diagonal situado en la intersección de las bóvedas, figuras 401 y 404, y que sobresale de la superficie, hacia el interior, en parte de su trazado para poder ser antifunicular.

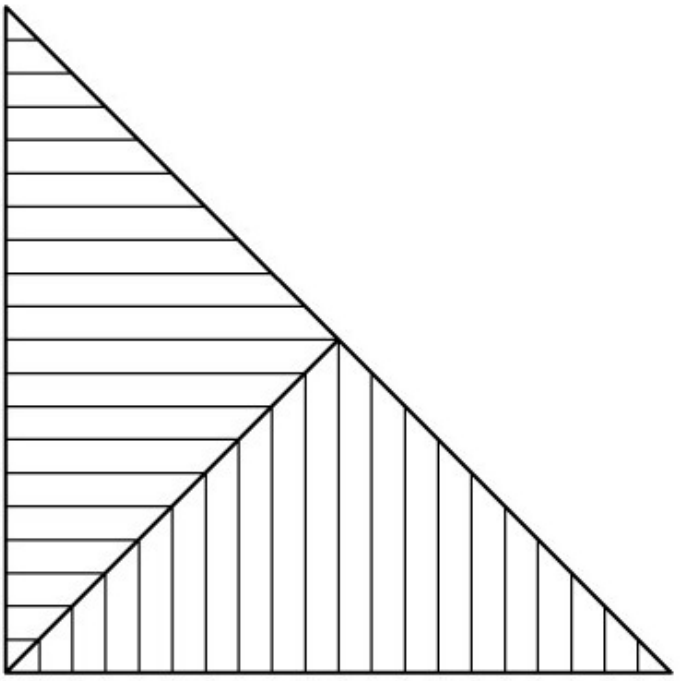


Figura 402: Esquema de la estructura de la cubierta en planta. *Ground plan structural diagram.*

Figura 403: Mercado al aire libre bajo la marquesina exterior. *The open-air market under the exterior shelter.*

Figura 404: Arco diagonal y arranque en la fachada principal. *Diagonal arch with its base in the facade.*

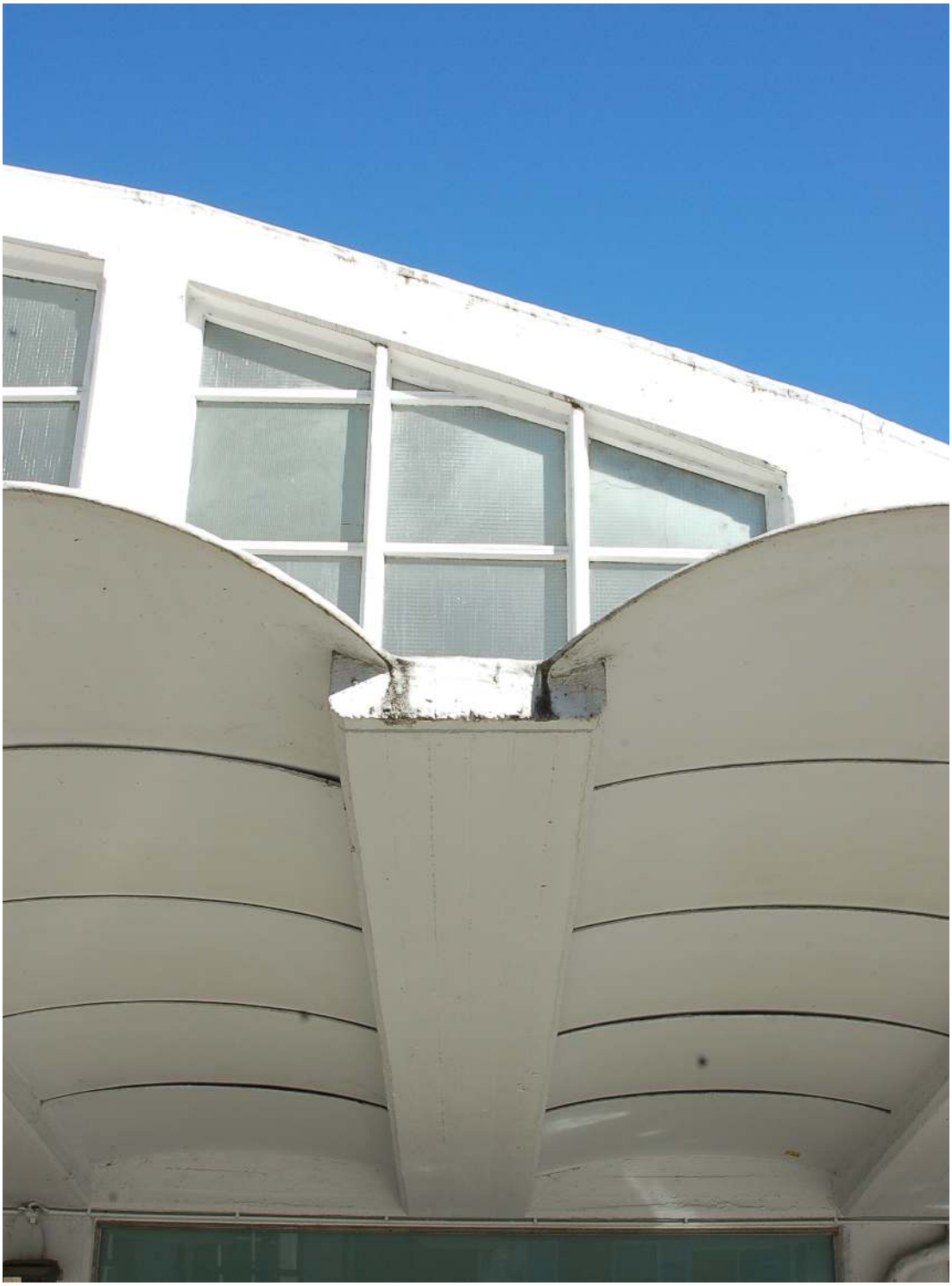


Figura 405: Ménsula exterior y cubierta de elementos prefabricados. *External cantilever and cover.*

Figura 406: Arranque de los arcos en las fachadas laterales.
Standard arch bases in the lateral facades.

The base of the arches in the middle of the main facade, figura 404, is another intense point of this project. This gives the dimensions of the parabolic arches of the vaults, 20 cm wide and with a 40 cm edge, while the arches in the main facade measure 60 cm × 60 cm, and the diagonal arch measures 70 cm wide and starts with an edge measuring 125 cm that varies to become 80 cm in the part that is visible in the interior (it divides).
The side facades have 6 m wide projecting roofs with inverted **T** beams, figure 405, (which he had already used in other projects) along the same plane as the parabolic arches, figure 406, over which thin plates rest on a fibre cement arch. This projecting roof now shelters an open-air market, as the inside of the building is now used for exhibitions and similar events.
As Javier Manterola says, Casinello and Revuelta Pol, 2011, pag. 181: "Daring men need luck, and they tend to find it. Pola de Siero market was a large job for him, as it was a long way from his basis hypothesis of designing structures that were easy to calculate, and it worked out well."
And in fact he was not lacking in daring, as everything indicates that he analysed this work using graphic statics. The work seems to prove his idea that beauty arises, by itself, after a logical project process. I do not know if this was actually the case, although it is indisputable that this project is an exceptional work in all senses. And it dates from 1931, which is incredible. The work is of international status.

El arranque de los arcos, en la mitad de la fachada principal, figura 404, es otro de los puntos intensos del proyecto. Ahí quedan a mano las dimensiones de los arcos parabólicos de la bóvedas, 20 cm de ancho por 40 cm de canto, los arcos de la fachada principal, de 60 cm × 60 cm, y el arco diagonal de 70 cm de ancho y que arranca con 125 cm de canto para pasar luego a 80 cm en la parte vista al interior (se desdobla).
En las fachadas laterales dispone unos voladizos de 6 m con vigas **T** invertidas, figura 405, (que ya usó en otros proyectos) en el plano de los arcos parabólicos, figura 406, sobre las que apoyan finas placas en arco de fibrocemento. Esos voladizos acogen ahora un mercado al aire libre, ya que el interior se usa para exposiciones y eventos de distinta naturaleza.
Como dice Javier Manterola, Casinello y Revuelta Pol, 2011, pag. 181: "Los hombres audaces necesitan suerte y la suelen encontrar. El Mercado de Pola de Siero le venía grande, se aleja de su hipótesis básica de diseñar estructuras fáciles de calcular, y le salió bien."
Y audacia, efectivamente, no le faltó, ya que todo indica que analizó la estructura utilizando la estática gráfica. La obra parece demostrar su idea de que la belleza surge, por sí sola, después de un proceso lógico de proyecto. No sé si realmente fue así, pero lo que sí es indudable es que creó una obra excepcional en todos los sentidos. Y en 1931. Increíble. El edificio tiene talla internacional.

Figura 407: Vista superior del tablero del puente. *Upper view of the bridge board.*

Figura 408: Vista inferior. *Lower view of the bridge.*

El puente del Milenio de Londres

Figura 409: Anclaje del extremo junto a la nueva Tate Gallery.
Anchorage of the end next to the New Tate Gallery.

The Millennium Bridge, London:
The price of forcing slenderness when there is also low stiffness against torsion.

The Millennium Bridge (1998-2000) in London is by the architect Norman Foster and the Ove Arup engineering company, with the aid of the sculptor Anthony Caro. It connects the New Tate Gallery with St. Paul's Cathedral.
This is a suspension bridge with three spans measuring 81 m, 144 mand 108 m, from north to south, figure 408. Its deck is 4 m wide. The enormous forces which the cables withstand are reflected very well in the anchorage close to the New Tate, figure 409.
It was estimated that it could hold 5,000 people. But in dynamic terms the problems began at far lower levels of occupation, when people were walking quickly. A short time after the bridge was opened people started to call it the "Wobbly Bridge".
The problem was that the motion of people walking excited the low torsion frequencies of the bridge, so that it was closed and re-opened in 2002, two years later.
This incident led to more attention being paid to this problem, which although well-known has rarely arisen in practice.

El puente del Milenio de Londres:
el precio de forzar la esbeltez con, además, una baja rigidez a torsión.

El puente del Milenio (1998–2000) de Londres es obra del arquitecto Norman Foster y de la ingeniería Ove Arup, con la colaboración del escultor Anthony Caro. Conecta la nueva Tate Gallery con la Catedral de San Pablo.
Es un puente colgante peatonal de tres vanos, con luces de 81 m, 144 m y 108 m, de norte a sur, figura 408. El tablero tiene 4 m de ancho. Las enormes fuerzas que soportan los cables se reflejan muy bien en el anclaje próximo a la nueva Tate, figura 409. Se estima que podría tener una ocupación de 5000 personas. Pero desde el punto de vista dinámico los problemas aparecen con ocupaciones mucho menores, cuando los transeuntes caminan deprisa. Al poco tiempo de su inauguración fue bautizado por la gente como "Wobbly Bridge" (el puente que se mueve o se mece).
El problema era que el paso de peatones resonaba con las bajas frecuencias de torsión del puente. Se cerró al poco tiempo de inaugurarse y se volvió a abrir en 2002, dos años más tarde. El incidente ha servido para prestar más atención a ese problema, conocido pero que, en la práctica, no ha sido excesivamente frecuente.

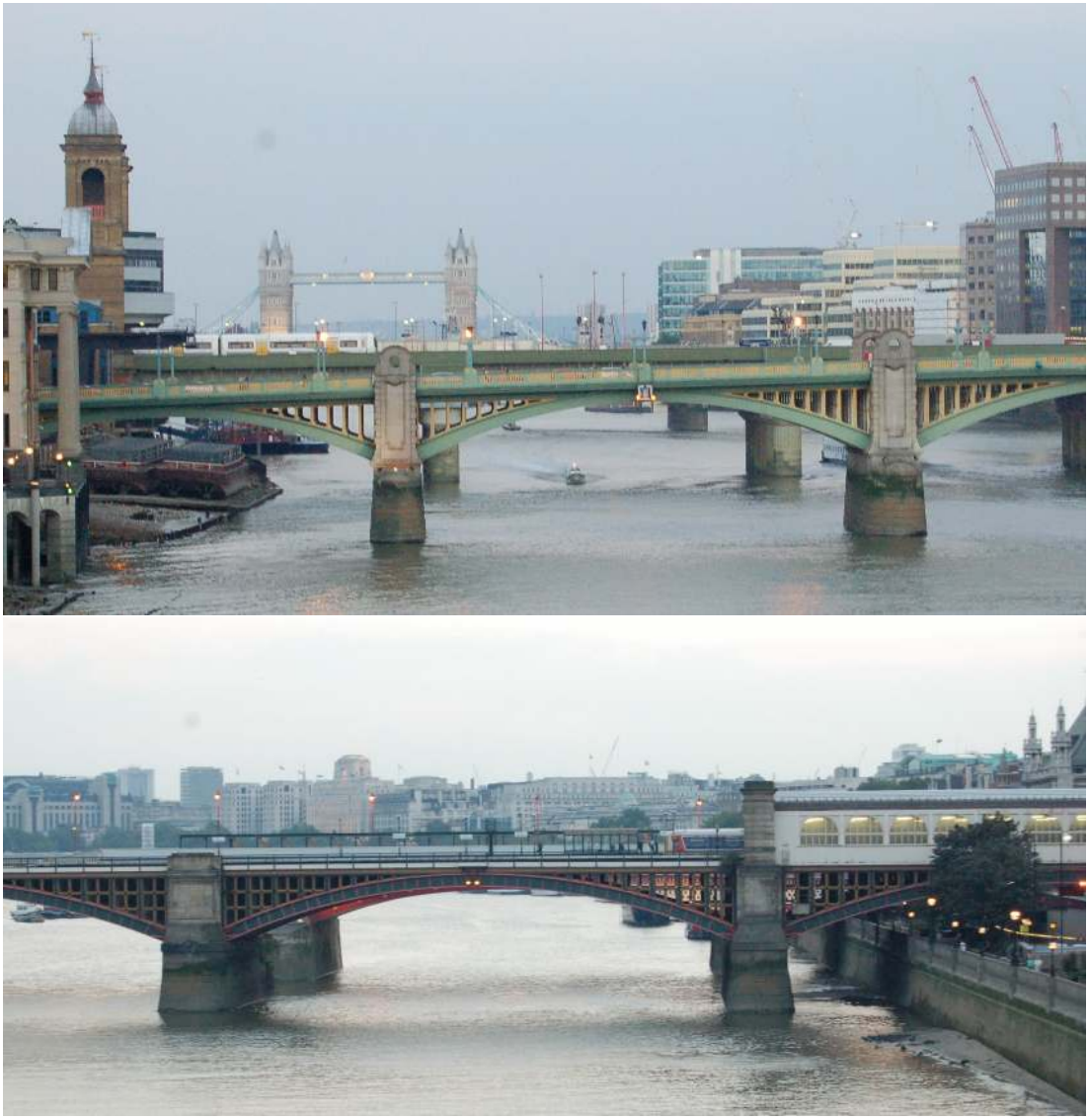


Figura 410: Puentes adyacentes de Southwark (izquierda) y Blackfriars (derecha).
The neighbouring bridges of Southwark (left) and Blackfriars (right).

Figura 411: Tramo tipo en el vano central. *A standard section in the middle span.*

Figura 412: Triangulación con un disipador de energia en el cruce de las barras y masas sintonizadas en los laterales. *Triangulation with an energy dissipater where the members cross, and tuned masses at the sides.*

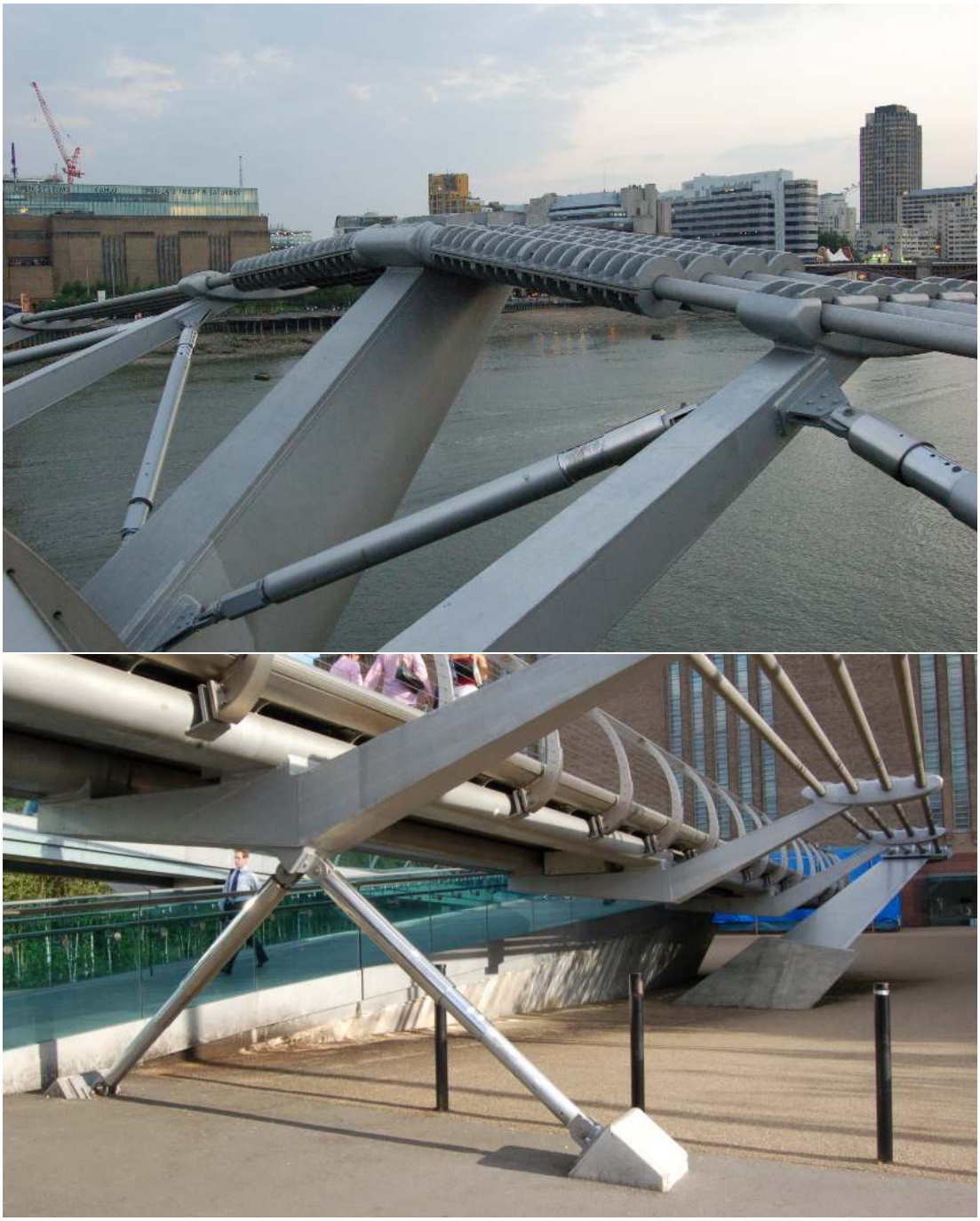


Figura 413: Amortiguadores añadidos. *Added dampers.*

This bridge is located between Southwark Bridge and Blackfriars Bridge, figura 410. Most of the bridges that cross the Thames are like these, with small spans and a structure underneath the deck, almost always an arch.

Foster wanted a deck with clean views and hardly any structure above it. But he also wanted a long central span of 144 m (the longest span of Southwark bridge is 73 m long, and that of Blackfriars is almost 60 m, which is not trivial) and a slenderness (the span-width ratio) of the suspension system of 63, which is clearly excessive, figures 407 and 408. It would have been usual with this span for slenderness to stand at about 10. Moreover, the type is not suitable for such spans, which are low for a bridge. When this type is used for such spans it is usually combined with a cable-stayed system or another one that works better with temporary loads.

Additionally, the stiffness of this bridge against torsion is very low, figure 411.

The combination of using a very high slenderness and low stiffness against torsion lead to its deficient dynamic behaviour. Damping systems and small tuned masses were added to resolve this, figures 412 and 413. Foster is recognised as being highly rigorous in how he uses structure, as is Ove Arup. But it is well-known that "if you don't make mistakes, you don't make anything". The measures applied a posteriori have corrected the deficient dynamic behaviour of the bridge. If they had been used from the first there would probably not have been any complaints about its high slenderness and low stiffness against torsion. Nevertheless, there would still have been a problem with the design. It is not reasonable to force the geometry and then correct the resulting problem with complex and expensive unconventional systems. Or at least that is how it seems to me. Otherwise, the beauty of this design is indisputable.

El puente está situado entre los de Southwark y Blackfriars, figura 410. La mayor parte de los puentes que cruzan el Támesis son así, con luces reducidas y una estructura bajo el tablero, casi siempre en arco.

Foster quería un tablero con vistas limpias, sin apenas estructura sobre él, pero, al mismo tiempo, una luz central importante, de 144 m (el puente de Southwark tiene una luz máxima de 73 m y el de Blackfriars de casi 60 m, que no es poca cosa) y una esbeltez (relación luz–flecha) del sistema colgante de 63, claramente excesiva, figuras 407 y 408.

Lo habitual, con esa luz, sería una esbeltez en torno a 10. Pero además el tipo no es adecuado para esas luces, reducidas para un puente. Cuando se usa con esa luz se suele combinar con el esquema atirantado u otro que funcione mejor a cargas no permanentes.

Pero además, la rigidez a torsión es muy baja, figura 411.

La combinación de una enorme esbeltez y una baja rigidez a torsión provocó su deficiente comportamiento dinámico. Para solucionarlo se añadieron sistemas de amortiguación y pequeñas masas sintonizadas, figuras 412 y 413.

Foster tiene acreditado un alto rigor en el manejo de la estructura. Lo mismo puede decirse de Ove Arup. Pero ya se sabe, solo no se equivoca quién no hace nada.

Las medidas adoptadas a posteriori han corregido las deficiencias del puente relativas a su comportamiento dinámico. Si se hubieran usado desde el principio probablemente no habría quejas sobre su gran esbeltez y su baja rigidez a torsión.

Pero seguiría habiendo un problema de diseño. No es razonable forzar la geometría y luego corregir el problema con complejos y caros sistemas poco convencionales. O al menos es así como yo lo veo. Por lo demás, la belleza del diseño es indudable.

Figura 414: Vista general del Wiener Riesenrad. *General view of Wiener Riesenrad.*

Wiener Riesenrad y London Eye

**Wiener Riesenrad and the London Eye:
Two big wheels that reflect the influence of the best techniques and scientific theories in structural design.**

The big wheel of the Vienna Prater (1897), (Wiener Riesenrad), figure 414, was designed by an Englishman, Walter Bassett, who had built two other big wheels in London and Blackpool. It is 64.75 m tall, and it is turned from its base. It became famous thanks to its appearance in the film The Third Man, in 1949.
Its axis rests on two pyramids of triangulated members. It has to be said that due to the time it was constructed all of the members are compound, with riveted connections and some bolted ones.
The whole structure hangs from the axis using the same pattern of strength as a bicycle wheel, although I do not think that there was pre-tensing of the spokes (as there is in bicycle wheels).
The spokes also prevent warping in the vertical plane. To prevent warping caused by torsion and in general to brace the structure there are two planes of spokes and a double exterior rim composed of a flexion- and torsion resistant box supported by diagonal cross-pieces.
The cabins project from this double line and hang from the elongation of the uprights, which are also braced by cables.
The whole device is a very good reflection of nineteenth century working; it is too complicated.
If there is any doubt about this complexity, a glance at the big wheel known as the London Eye will confirm it, figure 416, next to the Thames between Hungerford and Westminster Bridges.
The general principle of the bicycle wheel is used here, too, although here the spokes are surely pre-tensed to improve stiffness. There are two planes of spokes and no vertical ones, figure 417, as they run from the ends of the hum to the lower edge of the rim, as they do in a bicycle.

***Wiener Riesenrad* y *London Eye*:
dos norias que reflejan la influencia de las mejoras técnicas y científicas en el diseño de la estructura.**

La noria del Prater de Viena (1897), (*Wiener Riesenrad*), figura 414, es diseño del inglés Walter Bassett, que había construido otras dos norias en Londres y Blackpool. Tiene 64,75 m de altura, y se mueve empujada desde la base. Ha pasado ya a la historia por su aparición en la película *El tercer hombre* (Carol Reed, 1949).
El eje apoya en dos pirámides de barras trianguladas. Hay que decir que, dada la época, toda la perfilería es compuesta, con uniones roblonadas y algunas atornilladas. Toda la estructura cuelga de ese eje usando el mismo esquema resistente de la rueda de bicicleta, aunque desconozco que hubiera un pretensado de los radios (como, de hecho, sí hay en las ruedas de bici). Lo radios evitan, además, el pandeo en el plano vertical. Para evitar el pandeo a torsión, y en general arriostrar la estructura, se disponen dos planos de radios y un cordón exterior doble formando un cajón resistente a flexión y torsión con la ayuda de cruces de San Andrés.
Las cabinas salen fuera de ese doble cordón colgadas en la prolongación de los montantes, que también se arriostran por cables.
El conjunto refleja muy bien el modo de actuar de la ingeniería decimonónica: es demasiado complejo.
Si hay alguna duda de esa complejidad basta examinar la noria llamada London Eye junto al Támesis, figura 416, entre los puentes de Hungerford y Westminster.
El principio general de la rueda de bicicleta se mantiene. En este caso sí hay, con seguridad, un pretensado inicial de los radios para mejorar la rigidez. Existen dos planos de radios pero no verticales, figura 417, sino que van de los extremos del eje al borde interior del cordón, exactamente igual que en la rueda de bicicleta.

Figura 415: Detalle de las cabinas del Wiener Riesenrad. *Detail of cabins of Wiener Riesenrad.*

Figura 416: Vista general del London Eye. *General view of London Eye.*

Figura 417: Esquema de biela y tirante de apoyo del eje del London Eye. *View of the A-frame and hub reinforcing struts in London Eye.*

Figura 418: Cordón de sección triangular de la noria y sistema de arrastre del London Eye.
Triangular cross-section rim of the wheel and the drive system.

El cuelgue del eje se efectúa mediante dos bielas inclinadas a compresión y otros dos cables de contrarresto en tracción, anclados a la cimentación (seguramente un pilotaje). El cordón tiene una sección triangular y está formado por barras en triangulación, figura 418. La sección triangular ofrece resistencia a flexión y torsión. Esta última es vital para evitar el pandeo a torsión, más crítico que el del plano vertical, debido a la existencia de los radios.
Se emplea perfilería en tubos huecos de acero. Las uniones son muy limpias. Las cabinas se anclan por el exterior del cordón triangular, y se mueven sobre dos ejes circulares a medida que lo hace la noria. El arrastre se produce también desde abajo, tirando el motor de los dos cordones externos, figura 418.
Es un diseño limpio e ingenioso. En ello tienen mucho que ver los avances de la tecnología de cables, la posibilidad de usar perfiles tubulares del tamaño adecuado para no tener que recurrir a secciones compuestas complejas y, por supuesto, la soldadura, que no existía cuando se hizo la noria de Viena. Pero las trazas generales son, además, más sencillas. Pero claro, en el London Eye disponían del ordenador, que permite analizar complejos problemas de estabilidad, como es el caso.
Es decir, las mejoras en tecnología y también en el análisis, han posibilitado diseños de estructura más limpios, más lógicos, aunque ello pueda implicar un análisis más complejo, ya que eso ahora no es, por lo general hoy en día, un problema.

The hub is held by an inclined A-frame under compression with two cable stays as counterbalances under traction, anchored to foundations (surely piling).
The rim is triangular in cross-section and is composed of triangulated members, figure 418.
This triangular cross-section resists flexion and torsion. It is vital that it resists torsion as warping caused by torsion is more critical that warping in the vertical plane, due to the use of spokes.
Hollow steel sections are used, and the joints are very clean.
The cabins are attached to the outside of the triangular rim, and they rotate over two circular axles as the wheel rotates.
This wheel too is driven from below using two external rims, figure 418.
This design is clean and ingenious. It is very much based on improvements in cable technology and the possibility of using tubular sections of the right size, thereby avoiding the need for complex compound sections. And it also uses welded joints, which did not exist when the Vienna wheel was made.
Its lines in general are very simple, but of course, they could use computers for the London Eye, so that they could analyse complex stability problems, as is the case here.
Thus improvements in technology and no less so in analysis have made cleaner and more logical structural designs possible, and although more complex analysis is required for this, it is not generally a problem.

Figura 419: Puente colgante para el paso de tuberías en Viena, vista general. *Suspension bridge for pipes in Vienna, general view.*

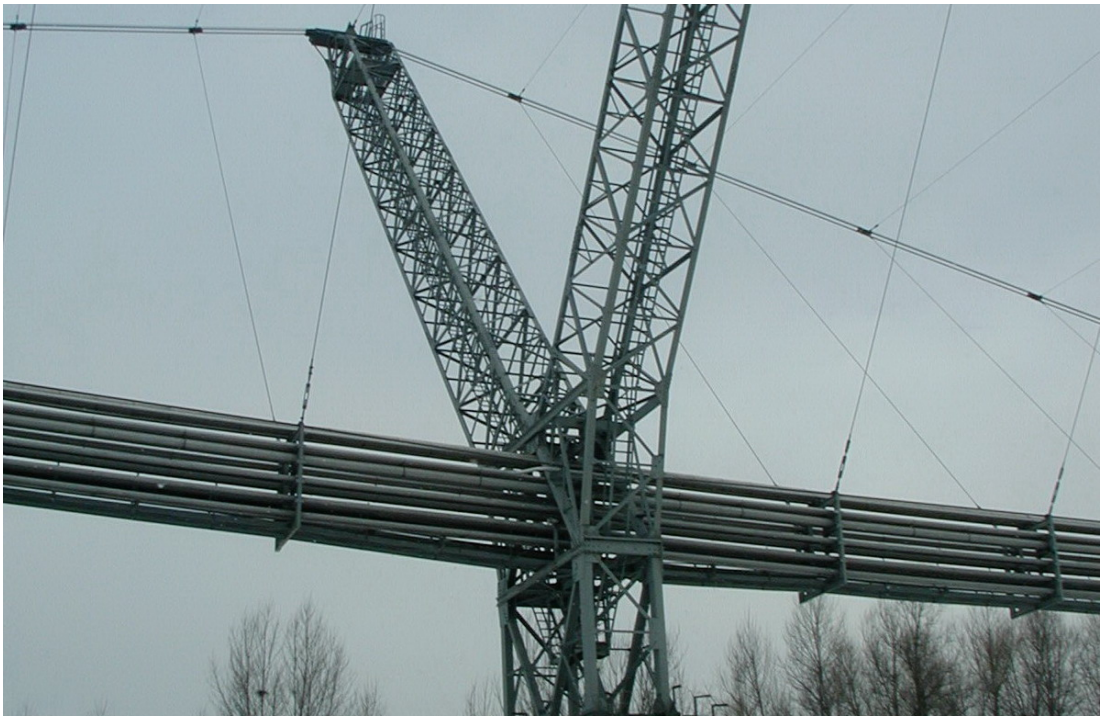


Figura 420: Vista de las torres. *View of a tower.*

Puente colgante sobre el Danubio

Figura 421: Sistema de cuelgue de las tuberías.
View of how the pipes are held.

Suspension bridge carrying pipes over the Danube in Vienna:
a spatial configuration to compensate for the lack of deck stiffness.

In the Vienna outskirts, in front of a Schwechat refinery (part of the ÖMV, the Austrian Oil Administration), there is a suspension bridge which carries pipes over the Danube, figure 419.
The main span is 260 m long, and the deck is only 1 m wide. The whole system of cables and members is in steel. It was built by the large Waagner-Biro AG Company in the after-war years. There is no information about its designer, so that it is highly probable that he worked as a technician for the construction company.
The problem with bridges of this type is that the deck is very narrow, so that it is very difficult to make any use of it to stiffen the bridge laterally against wind. The suspension system is divided into two inclined planes, which work in this way for the load arising from its own weight as well as the weight of the pipes and also against wind pressure.
The towers are made of metal sections, figure 420, which is explained by the small load they have to withstand and their V-shape, as well as by the fact this is simpler than using reinforced concrete.
The pipes are held in a metal framework that is joined to the suspension wires of the bridge, figure 421. At the base of the framework there is a 1 m wide triangulated walkway which is used during maintenance.
This work is included in a guide to the architecture in Vienna published by city institutions, Sarnitz, 1998, and it is worthy of this. It is magnificent. And it is also a lesson on the importance of form and the need to think in three dimensions (as Christian Menn reminds us).

Puente colgante para el paso de tuberías sobre el Danubio, Viena:
una configuración espacial para compensar la poca rigidez del tablero.

En las afueras de Viena, frente a una refinería de Schwechat (parte del ÖMV, Administración de Petróleo Austriaca), se levanta un puente colgante para el paso de tuberías sobre el Danubio, figura 419.
La luz principal es de 260 m y el tablero de solo 1 m de ancho. Todo el sistema es de acero, en cables y perfiles. Lo construyó la potente compañía Waagner-Biro AG en la posguerra. No hay datos del diseñador, así que es probable que fuese un técnico de la propia empresa.
El problema de este tipo de puentes es que el tablero tiene poca anchura, por lo que usarlo para dar rigidez lateral a viento es muy difícil.
El sistema en suspensión se divide en dos planos inclinados, que funcionan de ese modo tanto para la carga del peso propio y del peso de las tuberías, como también para la carga de viento.
Las torres se forman con perfiles metálicos, figura 420, lo que se entiende debido a la escasa carga que deben soportar y su forma en V. Construirlo así es más sencillo que hacerlo con hormigón armado.
Las tuberías se sujetan a un marco metálico al que se anclan los tirantes del puente, figura 421. En medio de ese marco, en la base, se dispone un tablero de 1 m de canto triangulado que sirve de paso para mantenimiento.
La obra la recoge una guía de arquitectura sobre Viena editada por instituciones de la ciudad, Sarnitz, 1998, lo que no extraña, pues es magnífica, y una lección sobre la importancia de la forma y el pensar en tres dimensiones (como recuerda Christian Menn).

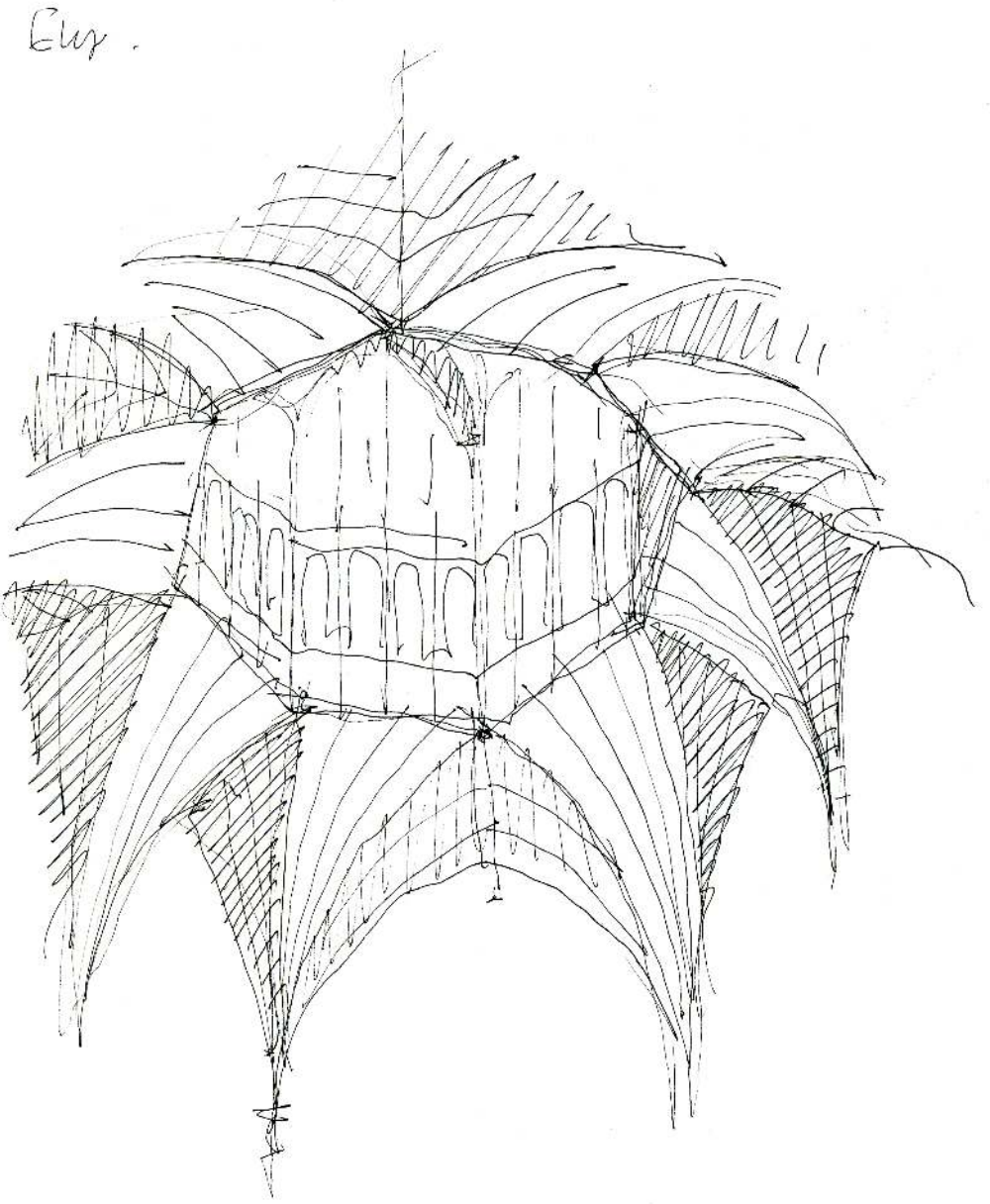


Figura 422: Crucero de la catedral de Ely. *The octagon in Ely Cathedral.*

Epílogo

- Más que hablar de la arquitectura como arte, creo que se debería hablar de la arquitectura como oficio, de buena y mala arquitectura. Lo mismo creo que sucede con la ingeniería.
- Es cierto que hay obras maestras, geniales, que van más allá del oficio. Pero para llegar ahí hay que pasar por el oficio, y además el alcanzar esas cotas está reservado a muy pocos, no se aprende sólo con esfuerzo. Es por ello que creo que sólo tiene sentido educar en el oficio, que ya es mucho. El genio, el artista, aparecerá por sí solo; no basta un buena formación. Además, en las obras geniales siempre se aprecia el oficio, es condición necesaria.
- La visita a la obra de calidad, el viaje, es imprescindible para aprender. No se trata de una opción. Y hablo de la educación del oficio, no ya de algo más.
- La revisión de obras publicadas es también esencial, hermana del viaje. La historia de las obras explica, en muchas ocasiones, grandes decisiones formales. Además, el dato técnico necesita de la escritura y el dibujo. Y finalmente, uno no puede visitar todo lo que se construye por más que quisiera y pudiera.
- Los modelos físicos siguen siendo una herramienta imprescindible para el desarrollo de proyectos de cierta complejidad, también en el ámbito de la estructura.
- No se diseña una estructura, se diseña una obra que tiene mucha más riqueza y complejidad. Diseñar es elegir, renunciar. Todo ello es mucho más sencillo cuando hay una idea general de proyecto con base. Con un mal guion no hay buena película posible, ni siquiera con buenos actores. Y una buena estructura no salva a un mal proyecto.

- Obviamente hablamos de procesos iterativos y complejos. Jürg Conzett, que trabajó ocho años con Peter Zumthor, comenta, creo que muy acertadamente, que no hay mucha diferencia entre los procesos de diseño de un edificio y de una estructura. Y define tres grandes etapas del proceso de diseño [a]: 1-ten claro el fin último, 2-usa los medios técnicos disponibles para conseguirlo, y 3-chequea el resultado. No creo que se puede expresar mejor de forma tan sintética.
- El oficio y la técnica siguen siendo algo crucial para el buen término de un proyecto.
- El papel de la estructura en el proyecto de arquitectura puede ser muy distinto, desde figurante a protagonista. El planteamiento general de la gran mayoría de las estructuras, convencionales, se puede hacer partiendo de un entendimiento bastante elemental de la teoría de estructuras. Conocer la construcción ligada a la estructura es casi siempre vital. Pero hay un punto, un grupo de obras, en que sólo el especialista es capaz de ejecutar diseños maestros. Afortunadamente, en obras complejas se trabaja en equipos grandes. Buenos equipos harán buenas obras. Y si de verdad le interesa el diseño que tiene a la estructura como protagonista, no lo quedará más remedio que saber mucho de estructuras. Y haber pisado muchas de calidad, claro.
- El ordenador ha facilitado enormemente no sólo el análisis y la comprobación de estructuras sino también su aprendizaje. Pero también es una herramienta de diseño imprescindible. Los programas paramétricos están abriendo nuevos campos. Y ello es aplicable al especialista y al no especialista. Por supuesto, cada uno con su software.
- Por encima de todo, **el amor a lo que uno hace** es condición *sine qua non*, el combustible sin el que nada anda. Con esa actitud, el oficio se alcanzará con toda seguridad.

[a] véase Jürg Conzett in Conversation with Mohsen Mostafavi, YOU TUBE, accedido el 14 de Enero de 2015 `https://www.youtube.com/watch?v=2eOeOT6G2IA`

Bibliografía

Ávila Jalvo, José Miguel (2014). «Ensayos en homenaje a José Luis de Miguel Rodríguez». En: ed. por Joaquín Antuña. Madrid: Instituto Juan de Herrera. Cap. España o los arcos del siglo VIII. De cómo el arco de herradura protagonizó la arquitectura ibérica entre los siglos VII al X, págs. 33-48.

Bairstow, Charlotte (2003). *Das Dach der Zukunft: Zollinger Lamellendächer der 20er Jahre ; Konstruktion, Statik, Ästhetik, Verbreitung, Nachfolge, Beispiele in Bayern*. Ed. por Florian Zimmermann. Catálogo de la exposición que tuvo lugar en la Fachhochschule München del 4 al 25 de Julio de 2003. München: Fachhochsch. München, Fachbereich Architektur.

Benet, Juan (1999 (1966)). *La inspiración y el estilo*. Con dos textos de Carmen Martín Gaite. Alfaguara-Grupo Santallana Ediciones.

Billington, David P. (1996). «Design in Education». En: *Proceedings of the Annual International Symposia of the IASS: Conceptual Design of Structures*. IASS. Stuttgart: IASS, págs. 469-473.

Borgart, A. y T. Kocaturk (2007). «Free Form Design as the Digital "Zeitgeist"». En: *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 48.4, págs. 3-9.

Casinello, Pepa y Bernardo Revuelta Pol, eds. (2011). *Ildefonso Sánchez del Río Pisón: el ingenio de un legado*. Madrid: Fundación Juanelo Turriano.

Durand, J.N.L. (1981). «Compendio de Lecciones de Arquitectura. Parte Gráfica de los Cursos de Arquitectura». En: Prólogo de Rafael Moneo. Madrid: Pronaos. Cap. Prólogo, págs. V-XIII.

Eckhout, Mick (1971). «Frei Otto and the Munich Olympic games». En: *Zodiac* 21, págs. 13-74.

Fernández Cabo, José L. (2014). «Estructuras. Ensayos en homenaje a José Luis de Miguel Rodríguez». En: ed. por Joaquín Antuña Bernardo. ETS de Arquitectura de Madrid. Cap. Sobre viajes y estructuras, págs. 85-109.

Fernandez Cabo, Jose L. y col. (2014). *Estructuras I: Ejercicios sobre funiculares*. E.T.S. Arquitectura (UPM), Madrid http://oa.upm.es/30854/.

Fernández-Cabo, Jose L. y col. (2015). «Assessment of wire-frame analysis models of a historical planked timber arch». En: *Building and Structures, Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 168.9, págs. 680-694.

Fonseca Ferreira, Carina y col. (2015). «Numerical Modelling and Seismic Assessment of Historic Planked Timber Arches». En: *Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration* 9.6, págs. 712-729.

Fraser, Donald (1981). *Conceptual Designs and Preliminary Analysis of Structures*. Marshfield, Massachussetts: Pitman Publishing Inc.

Goldsmith, Myron (1953). «The Tall Building: the Effects of Scale». Tesis de mtría. College of Architecture, IIT, Chicago.

Harris et al., Alan J. (1981). «Discussion on "Can design be taught?" by Alan Harris». En: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 1* 70.2, págs. 343-354.

Herzog, Jacques (2015). *Entrevista a Jacques Herzog*. El País Semanal, Nº 2025. Por Anatxu Zabalbeascoa.

Herzog, Thomas, ed. (2000). *Symbolbauwerk zur Weltaustellung Hannover 2000-Roof Structure at the world exhibition Hannover 2000*. München: Prestel.

Herzog, Thomas y col., eds. (2004). *Timber construction manual*. Basel: Birhäuser.

Hewett, Cecil A. (1985). *English Cathedral and Monastic Carpentry*. Oxford: Phillimoore y Co. Ltd.

Hurtado Valdez, Pedro A. (2012). «Bóvedas encamonadas: origen, evolución, geometría y construcción entre los siglos XVII Y XVIII en virreinato del Perú». Tesis doct. Madrid: ETS Arquitectura, UPM.

Kawaguchi, Mamoru (1996). «Conceptual Design Suggested by Our Forerunners». En: *Proceedings of the Annual International Symposia of the IASS:Conceptual Design of Structures*. IASS. Stuttgart: IASS, págs. 3-6.

Kersten, C, ed. (1926). *Freitragende Holzbauten*. Berlin: Julius Springer.

Kessler, Andreas (1996). *Vom Holzsteg zum Weltmonument, die Geschichte der Salginatobelbrücke*. AG Buchdruckerei Schiers.

Khan, Yasmin Sabina (2004). *Engineering Architecture: the vision of Fazlur R. Khan*.

Komendant, August E. (1975). *18 years with architect Louis I. Kahn*. Existe versión en Castellano publicada por Colegio Oficial de Arquitectos de Galicia, La Coruña, 2000; con comentarios adicionales de Oscar Tenreiro y Fernando Agrasar Quiroga. Englewood, N.J.: Aloray.

Krings, Ulrich (1985). *Bahnhofsarchitektur*. München: Prestel.

Kuhn, Thomas S. (1970). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: The University of Chicago Press.

Laffranchi, Massimo y Peter Marti (1997). «Robert Maillart´s curved concrete arch bridges». En: *Journal of Structural Engineering ASCE* 123.10, págs. 1280-1286.

Leupold, Jacob (1726). *Theatrum Pontificiale*. Leipzig: Christoph Zunckel.

Marrey, B. (2006). «Nicolas Esquillan, firm engineer». En: *International Journal of Space Structures* 21.1, págs. 43-51.

Millanes Mato, Francisco (2000). «Tendencias en el diseño de puentes». En: ed. por María D. G. Pulido, Juan A. Sobrino y José Romo. Madrid: Grupo Español del IABSE. Cap. Puente del Infante D. Henrique en Oporto y pasarela en acero inoxidable en Abandoibarra, Bilbao, págs. 329-365.

Moneo, Rafael (2009). «Rafael Moneo. Escritos y conversaciones en el Perú». En: ed. por Manuel Flores Caballero. Pontificia Universidad Católica del Perú. Cap. Sobre el concepto de arbitrariedad en arquitectura, págs. 55-132.

Motro, René (2011). «Art and Structural Engineering. Art of Structural Engineering». En: *Journal of Structural Engineers World Congress*, págs. 63-68.

Motro, René y Bernard Maurin (2011). «Bernard Laffaille, Nicolas Esquillan, two french pioneers». En: *IASS Symposium 2011, London*.

Natterer, J., N. Burger y A. Müller (2002). «Space structures 5». En: ed. por G.A.R. Parke y P. Disney. Publicación de las actas del International Conference on Space Structures, 5th, 2002, University of Surrey. London: Thomas Telford. Cap. The Roof Structure "Expodach" at the world exhibition Hannover 2000, págs. 185-193.

Plugsley, Sir Alfred, ed. (1976). *The works of Isambard Kingdom Brunel: An Engineering Appreciation*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Price, Cedric, ed. (2003(1984)). *Cedric Price. The Square Book*. West Sussex, England: Wiley-Academy.

Ramm, Ekkehard y Eberhard Schunck (1986). *Heinz Isler Schalen*. Stuttgart: Karl-Krämer.

Sarnitz, August, ed. (1998). *Architecture in Vienna*. Promovido por el Stadplanung Wien y el Architectur Zentrum Wien. Wien: Springer.

Shiner, Larry (2001). *The Invention of Art*. Chicago: The Univesity of Chicago Press.

Virlogeux, Michel (2002). «Design and Designers». En: *Concrete Structures in the 21st Century*. Proceedings of the 1st FIB Congress. FIB. Osaka, Japan: FIB, 25p.

Wade, E.C. y J. Heyman (1985). «The Timber octagon of Ely Cathedral». En: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 78.6, págs. 1421-1436.

Weller, Bernhard, Martin Tasche y Julia Baatz (2009). «Lamella Roof Constructions by Hugo Junkers». En: *Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures*. Ed. por Alberto Domingo Cabo y Carlos Manuel Lázaro Fernández. http://hdl.handle.net/10251/7160. Valencia: Editorial Universitat Politécnica de Valencia, págs. 1611-1621.

Williams, Chris J.K. (2001). «The analytic and numerical definition of the geometry of the British Museum Great Court Roof». En: *Mathematics and design 2001*. Ed. por M. Burry y col. Geelong, Australia: Deakin University, págs. 434-440.

Zastavni, Denis (2008). «The Structural Design of Maillart's Chiasso Shed (1924): A Graphic Procedure». En: *Structural Engineering International* 18.3, págs. 247-252.

Zumthor, Peter (2006). *Atmospheres. Architectural enviroments. Surrounding objets*. Basel: Birkhäuser.